

Johanna Salo

**Rakennuksen homeiden aineenvaihduntatuotteiden
mittaamiseen perustuvan analytiikan kehittäminen**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten
Espoossa 14. toukokuuta 2014

Valvoja: Prof. Martti Viljanen, Aalto-yliopisto

Ohjaaja: Prof. Mirja Salkinoja-Salonen, Helsingin yliopisto

Tekijä Johanna Salo

Työn nimi Rakennuksen homeiden aineenvaihduntatuotteiden mittaamiseen perustuvan analytiikan kehittäminen

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

Pää-/sivuaine Rakennusmateriaalien ja rakennusfysiikan pääaine**Professuurikoodi** Rak-43

Työn valvoja Prof. Martti Viljanen

Työn ohjaaja(t) Prof. Mirja Salkinoja-Salonen

Päivämäärä 14.05.2014**Sivumäärä** 99 + 8**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Työn tavoite oli kehittää menetelmiä paikallistamaan haitalliset homevauriot suurista rakennuskokonaisuuksista. Uutena näytteenottotekniikkana kehitettiin toksisuusmittauksiin riittävän sisäilmanäytteen kerääminen vesihöyryä kondensoimalla. Toksiinien kulkeutuminen ilmatilassa vesihöyryn mukana todennettiin laboratoriomittauksin. Kaasumaisten aineenvaihduntatuotteiden, VOC ja CO₂, käytettävyyttä paikallisten ja ajantasaisten muutosten indikaattoreina selvitettiin. Lisäksi tutkittiin jo julkaistulla menetelmällä eri tilojen homekantojen toksisuuskirjoa.

Ilmankosteutta on pidetty vain homeiden kasvun edistäjänä, mutta tässä työssä havaittiin kosteuden myös kuljettavan toksisia aineita. Sisätilan vesihöyryn kondensointi on toistettava ja kvantitatiivinen keräysmenetelmä. Kondensoitu vesihöyry edustaa tilan käyttäjien hengitysilman laatua. Ongelmatilojen sisäilmasta 17,5 ilmakeitistä 3-5 vuorokauden aikana kondensoitu vesi riitti haitallisuuden toteamiseen erilaisin solutestein. Eri huoneiden kondenssivedet erosivat sekä toksisuuden että väkevyyden suhteen. Toimistohuoneen ilmasta saatiin 1000 µg kuiva-ainetta, joka jo 10 – 15 µg/ml pitoisuuteen laimennettuna oli myrkyllistä hermosoluille kolmen vuorokauden ja siittiösoluille tunnin altistuksessa.

Haittatiloista kasvatetut homekannat erittivät aktiivisesti nestepisaraita, joiden toksisuus oli moninkertainen itse kasvustoon verrattuna ja monisatakertainen hiukkaskeräyspölyjen toksisuuteen verrattuna. Haittatilasta eristetyn *Penicillium expansum* -kannan erittämät nestepisarot olivat toksisia kohdesoluille vielä 1000–10000 -kertaisina laimennoksina. Pisarot sisälsivät ketoglobosiinia ja kommunesiinia. Näiden todettiin kulkeutuvan vesihöyryn mukana suljetussa ilmatilassa.

Online-kaasusensoreilla ja adsorbenttikeräimillä todettiin eri VOC-ryhmillä erilaiset ajasta riippuvat käyttäytymisprofiilit huoneilmassa. Alkoholiryhmän yhteispitoisuus kymmenkertaistui, aldehydyryhmän 17-kertaistui, terpeeniryhmän viisinkertaistui ja ketoniryhmän puolittui, kun ilmanvaihto oli ollut 12 tuntia pois päältä. Helposti haihtuvien yhdisteiden (VVOC) yhteispitoisuus oli kaikissa näytteissä lähes sama (289–293 µg/m³).

Sisätilanäytteiden homeiden toksisuuskirjo antoi täsmätietoa sisäilman homeitiöiden laadusta. Saman rakennuksen joissakin huoneissa 100 % tutkituista pesäkkeistä osoittautui toksiinia tuottaviksi, joissakin huoneissa ei yksikään. Toksiset pesäkkeet olivat ehdoton enemmistö huoneissa, joiden käyttäjillä oli sisäilmaan liittyvää haittaoireilua.

Jatkossa tulee tutkia rakennusmateriaalialustan ja olosuhteiden vaikutusta homeiden toksisten nestepisaroiden tuottoon ja toksiinien kulkeutumismekanismeja eri kosteuspitoisuuksissa. Lisätutkimuksia tarvitaan vielä selvittämään, soveltuuko vesihöyrystä kondensoimalla kerätty sisäilmanäyte homevaurioituneen rakennuksen haitallisten tilojen paikallistamiseen. Perustutkimusta tarvitaan selvittämään olosuhteiden vaikutusta toksisten homekantojen valikoitumiseen.

Avainsanat VOC-profiili, *Penicillium expansum*, haitta-aineet vesihöyryssä, mykotoksiini, hometoksiini, toksiinien kulkeutuminen, homeiden tuottamat toksiset nestepisarot



Author Johanna Salo		
Title of thesis Development of analytical methods for assaying metabolites of molds in buildings		
Degree programme Structural Engineering and Building Technology		
Major/minor Building Materials and Physics		Code of professorship Rak-43
Thesis supervisor Prof. Martti Viljanen		
Thesis advisor(s) Prof. Mirja Salkinoja-Salonen		
Date 14.05.2014	Number of pages 99 + 8	Language Finnish

Abstract

Aim of this project was to develop methods for locating harmful mold contamination in large buildings. Condensing water vapour directly from indoor air was developed as a sampling technique compatible with assaying toxicity. Toxicity assays executed in the laboratory confirmed that airborne water vapour was a carrier of toxins in indoor space. The applicability of gaseous metabolites, VOC and CO₂, was evaluated as an indicator of temporal and local changes of the spectrum of molds in indoor space.

Indoor moisture has, so far, been considered as a promoter of mold growth, but in this work it was shown that airborne moisture is a carrier of toxic compounds. Condensing airborne moisture enabled repeated and quantitative sampling. Water condensed from the indoor vapour reflects the quality of air inhaled by the occupants of the space. Water condensed from 17,5 cubic meters of air within 3 to 5 days was sufficient for assaying harmful air contaminants by cell toxicological methods. Condensates harvested from different rooms differed in toxicities and concentrations of the contaminants. The condensate harvested from one office contained 1000 µg of substances that, within one hour of exposure, provoked toxic response in sperm cells at dilutions of 10 to 15 µg/ml.

Molds cultured from the damaged rooms emitted exudates that were in cell tests many-fold more toxic than extracts prepared from the mold and several hundred-fold more toxic compared to settled dusts. *Penicillium expansum*, an isolate from one of the damaged spaces, emitted exudate droplets that were toxic in cell exposures even when diluted 1000 – 10 000 fold. These droplets contained chaetoglobosin and communesin. Water vapour was shown to vehicle these substances in enclosed space.

Gas sensing on-line and adsorbent samplings revealed differences in the profiles and time-dependence of different VOC groups in indoor air. Substances of the alcohol group ten-folded, aldehydes 17-folded, terpene-group five-folded whereas the ketone group halved during ventilation downtime of 12 hours. The summed concentration of very volatile (VVOC) was unchanged, 289 to 293 µg/m³, in all samplings.

The diversity of toxic indoor molds gave important clues on the prevalence and properties of contaminants in indoor air. Within one building, in some rooms up to 100% of the colonies from dust and fall-out plates produced toxins, whereas in some rooms no producers were found. In rooms where building-related ill-health symptoms were reported, majority of the colonies were toxic.

The results invite for continued investigation of materials and conditions controlling the generation of toxic aqueous exudates from molds and the mechanisms and moisture dependence of their air-borne carriage. Further investigation is needed to assess whether condensate samplings are useful for localizing the damaged sites within buildings. Basic research is needed to clarify conditions elective for toxic molds.

Keywords VOC profile, mycotoxin, toxic compounds in water vapour, toxic guttation droplets

Sisällysluettelo

Käytetyt symbolit ja määritelmät	7
Alkusanat	10
1 Johdanto	11
2 Home rakennuksessa	13
2.1 Homevaurio osana sisäilmaongelmaa	13
2.2 Homevaurion paikallistamisen nykymenetelmät	14
2.2.1 Sisäilmaongelmaisen rakennuksen tutkimuksen vaiheet	14
2.2.2 Sisäilman mikrobimittaukset	14
2.2.3 Sieni-itiöpitoisuus homevaurion indikaattorina	17
2.2.4 Sisäilmalle poikkeuksellinen sieni-itiöiden suku- tai lajijakauma homevaurion indikaattorina	18
2.3 Homeiden kasvu ja kulkeutuminen rakennuksissa	19
2.3.1 Olosuhteet homekasvulle rakennuksessa	19
2.3.2 Rakennuksissa yleiset homelajit	21
2.3.3 Homeiden kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa	23
3 Homeiden aineenvaihduntatuotteet homevaurion indikaattorina	25
3.1 Mikrobiperäiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet (MVOC)	25
3.1.1 Ominaisuudet	25
3.1.2 VOC-tuotto rakennusmateriaalialustalla	25
3.1.3 Kaasumaisten aineiden kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa	27
3.1.4 VOC-näytteenotto ja analysointi	27
3.1.5 MVOC-pitoisuudet sisäilmassa	28
3.1.6 MVOC homevaurion indikaattorina	28
3.2 Sisäilman hiilidioksidipitoisuus	29
3.3 Hometoksiinit	30
3.3.1 Hometoksiinien tuotto rakennusmateriaaleilla	30
3.3.2 Toksiinien kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa	32
3.3.3 Toksiinien näytteenotto- ja analysointitekniikat	32
3.3.4 Sisäilman hometoksiinipitoisuudet ja toksisuus	34
3.3.5 Hometoksiineja nestepisaroissa	35
4 Kokeellinen tutkimus	37
4.1 Kokeellisen työn tavoitteet	37
4.2 Kokeellisen työn menetelmät	37
4.2.1 Kenttäkokeiden kohdekuvaukset	37

4.2.2	Koekammioiden kuvaukset.....	39
4.2.3	Näytteenotto- ja viljelymenetelmät pölystä, rakennusmateriaalista sekä sisäilmasta.....	40
4.2.4	Kondenssivesien käsittely toksisuusmittauksia varten.....	43
4.2.5	Toksisuustestit.....	43
4.2.6	Sisäilman vesihöyryn kondenssikeräyslaite.....	46
4.2.7	VOC-mittauksissa käytetyt laitteet ja menetelmät.....	47
4.2.8	Hiilidioksidimittauksissa käytetyt laitteet ja menetelmät.....	49
4.3	Koejärjestelyt ja aikataulu.....	50
4.3.1	Viljelynäytteet toksisuustutkimukseen.....	50
4.3.2	Sisäilman vesihöyryn kerääminen.....	51
4.3.3	Haihtuvien orgaanisten aineiden mittausaikataulu.....	53
4.3.4	Homeiden CO ₂ -tuoton mittaus suljetussa kammiossa.....	53
4.3.5	Homeen toksisten nestepisaroiden tuotto ja kulkeutuminen suljetussa ilmatilassa.....	55
5	Tulokset.....	56
5.1	Haitta-aineiden etsintä viljellyistä sisätilahomeista.....	56
5.1.1	Viljelmien toksisuus.....	56
5.1.2	Sisätilojen viljelynäytteistä tunnistetut hometoksiinit.....	59
5.1.3	Tulosten tarkastelu viljelynäytteistä.....	60
5.2	Sisäilman vesihöyry haitta-aineiden kuljettajana.....	60
5.2.1	Kondensoidun veden keräys sisäilmasta.....	60
5.2.2	Sisäilmasta tiivistetyn veden analysointi.....	64
5.2.3	Sisäilmasta tiivistetyn veden toksisuuden tutkiminen.....	65
5.2.4	Sisätilahomeiden toksiset nestemäiset aineenvaihduntatuotteet.....	66
5.2.5	Rakennushomeen tuottamien toksiinien kulkeutuminen ilmatilassa...	67
5.2.6	Tulosten tarkastelu vesihöyrystä haitta-aineiden kuljettajana.....	71
5.3	Haihtuvat yhdisteet (VOC) sisäilman laadun indikaattorina.....	72
5.3.1	Kaasusensoreilla saadut tulokset.....	72
5.3.2	Adsorbenttimenetelmä sisäilman VOC-indikaattorina.....	72
5.3.3	Tulosten tarkastelu VOC-mittauksista.....	81
5.4	Hiilidioksidi rakennuksen mikrobitoiminnan indikaattorina.....	82
5.4.1	Kammiokokeet indikaattorihomeilla.....	82
5.4.2	Rakenteiden hiilidioksidipitoisuus mikrobitoiminnan indikaattorina.....	85
5.4.3	Tulosten tarkastelu hiilidioksidista homevaurion indikaattorina.....	86
6	Johtopäätökset.....	87

7 Yhteenveto.....	91
Lähdeluettelo	93
Liite A. Mikrobiperäisiä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ja niiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia.	100
Liite B. VOC-adsorbenttinäytteiden kromatokrammit	105

Käytetyt symbolit ja määritelmät

Altistuminen: Tilanne, jossa sisäympäristössä oleva fysikaalinen, biologinen tai kemiallinen tekijä joutuu kosketukseen ihmisen kanssa. Edellä mainitun tekijän hengittäminen, nieleminen, kosketus silmiin tai iholle ovat altistumista. Altistuminen ei tarkoita sairastumista, mutta voi johtaa siihen.

Bioaerosoli: Bioaerosoli on eloperäinen aerosolihiukkanen.

EC₅₀: EC₅₀ ”half maximal effective concentration” on pitoisuus, jonka aiheuttama vaurio todetaan 50 %:ssa altistetuista eliöistä tai soluista.

Fragmentti: Fragmentti on sienirihmaston osa.

Home: Homeet ovat rihmasieniä, jotka lisääntyvät suvuttomasti itiöiden avulla.

Impaktori: Impaktori on hiukkaskeräin.

Kosteus- ja homevaurio: Kosteusvaurio, jossa todetaan homekasvustoja.

Kosteusvaurio: Kosteusvaurio on liiallisesta tai pitkäaikaisesta kosteudesta aiheutuva materiaalin tai rakenteen kosteussietokyvyn ylittyminen tai ominaisuuksien muuttuminen siten, että rakenne tai rakenteen osa tulee korjata tai vaihtaa.

Kosteusvaurioindikaattori: Kosteusvaurioindikaattori on mikrobi, jota ei yleensä tavata terveessä, vaurioitumattomassa rakennuksessa ja jonka esiintyminen rakennuksesta otetussa näytteessä viittaa siihen, että rakenteessa on tai on ollut kosteusvaurio. Näiden mikrobien esiintyminen kosteusvauriorakennuksissa on merkki rakenteiden liiallisesta kostumisesta, ellei niiden esiintymiselle ole muuta syytä. Indikaattorimikrobeina pidetään myös ns. tavanomaisia mikrobeja jos niitä esiintyy suurina pitoisuuksina näytteissä.

Kuntoarvio: Kuntoarviossa selvitetään kiinteistön tilojen, rakennusosien, taloteknisten järjestelmien ja ulkoalueiden kunto aistinvaraisesti, arvioidaan kiinteistön korjaustarpeen ja laaditaan pitkän tähtäimen kunnossapitosuunnitelma.

Kuntotutkimus: Kuntotutkimus on rakennuksen, rakennelman tai kiinteistöön kuuluvien järjestelmien kokonaisvaltainen tutkimus elinkaaren vaiheen tai korjaustarpeen määrittämiseksi. Kuntotutkimuksessa voidaan käyttää rakenteita rikkovia menetelmiä vaurioiden laajuuden ja syiden täsmentämiseksi.

Merkittävä kosteus- ja homevaurio: Vähäistä laajempi rakenteellinen vika, jonka seurauksena haitallinen altistuminen kosteusvaurioituneista rakenteista ja materiaaleista vapautuville kemiallisille, fysikaalisille ja biologisille epäpuhtauksille on todennäköistä.

Metabolia: metabolia = aineenvaihdunta.

Mikrobitoksiini: Mikrobitoksiini on home- ja hiivasienten tai bakteerien rakenneosasia tai niiden tuottamia aineenvaihduntatuotteita, joilla on osoitettu olevan haitallisia, toksisia vaikutuksia korkeampiin eliöihin.

Mikrobivaurio: Mikrobivaurio on bakteereiden, home- ja hiivasienten tai lahottajien haitallista esiintymistä rakennuksessa.

Mykotoksiinit: Mykotoksiinit eli hometoksiinit ovat home- tai hiivasienten tuottamia haitallisia aineenvaihduntatuotteita (sekundäärimetaboliitteja).

Ohjearvo: Viranomaisten antamat ohjearvot määrittävät eri tekijöiden määrää tai pitoisuutta sisäilmassa, jota ei tule ylittää.

Sekundäärimetabolia: Sekundäärimetabolia tarkoittaa aineenvaihduntaa, joka ei palvele välitöntä solujen kasvua tai uusiutumista.

Sisäilma: Sisäilma on rakenteiden rajaamalla alueella olevaa ilmaa.

Sisäilmaongelma: Sisäilmaongelma on terveyttä tai turvallisuutta vaarantava puute tai ongelma rakennuksen tai sen osan ilmassa.

Sisäilmasto: Sisäilmastolla tarkoitetaan sisäilman sekä lämpö- ja kosteusolosuhteiden muodostamaa kokonaisuutta.

Toksiini: Toksiini on eliön tuottama myrkyllinen aine, joka syntyy eliön aineenvaihdunnassa (sekundäärimetabolia).

Toksisuus: Toksisuus eli myrkyllisyys kuvaa kemiallisten aineiden kykyä aiheuttaa elimistön toiminnan häiriöitä tai rakenteellisia vaurioita

Toksisuustiitteri: Toksisuustiitteri on kerroin, joka ilmaisee moninko -kertaisesti ainetta tai aineiden seosta on laimennettava, jotta se ei enää aiheuta myrkyllisyyttä.

Viitearvo: Sisäilman laatua arvioitaessa viitearvolla tarkoitetaan yksittäisten tekijöiden tutkimuksissa todettua määrää tai pitoisuutta sisäilmassa. Tarkastelu perustuu usein tutkimusaineiston tilastolliseen käsittelyyn. Viitearvo P50 kuvaa tavanomaista sisäilman laatutasoa ja P90 tasoa, jonka ylitys viittaa selvästi epätavanomaisen puhtauslähteen olemassaoloon.

Käytetyt lyhenteet

FFL	Kissan sikiön keuhkosolu
GC	Kaasukromatografi
LC	Nestekromatografi
MEA	“Malt Extract Agar” mallas-agar -malja
MNA	Hiiren hermosolu
MS	Massaspektrometri
MVOC	Mikrobiperäinen haihtuva orgaaninen yhdiste
PK-15	Sian munuaisepiteelisolu
TOW	“Time-of-wetness”, ajanjakso [h], jolloin suhteellinen kosteus materiaalissa ylittää homeen kasvulle tarvittavan kosteuden.
TVOC	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä
VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste
VVOC	Helposti haihtuva orgaaninen yhdiste

Alkusanat

Työ tehtiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen rakennusfysiikan tutkimusryhmän ja Helsingin yliopiston Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitoksen Mirja Salkinoja-Salosen tutkimusryhmän yhteistyönä. Mikrobiologiaan ja toksisuusanalyysieihin liittyvät menetelmät ja työvaiheet teki tai opetti tutkijatohtori Maria A. Andersson Helsingin yliopistosta. Kemiaalliset analyysit teki tutkijatohtori Raimo Mikkola Aalto-yliopistosta.

Haluan kiittää erityisesti työni valvojaa, Aalto-yliopiston talonrakennustekniikan professori Martti Viljasta työn mahdollistamisesta, innostuneesta ja innostavasta asenteesta tutkimusaihetta kohtaan sekä lukuisista neuvoista työn kirjoittamiseen ja aiheen käsittelyyn. Erityiskiitokset kuuluvat myös professori Mirja Salkinoja-Saloselle työn ohjaamisesta, mikrobiologian ja tieteellisen kirjoittamisen opettamisesta, jatkuvasta kannustamisesta, ajankäytöstä, työhön liittyvistä kommentteista sekä innostavasta suhtautumisesta sisäilmaongelmien selvittämiseen, työhön ja tutkimukseen.

Haluan kiittää tutkijatohtori Maria A. Anderssonia, Helsingin yliopisto, Elintarvike- ja ympäristötieteiden laitos, lukuisten mikrobiologisten menetelmien ja toksisuusanalyysien opettamisesta ja tekemisestä, asiantuntemuksen ja tiedon jakamisesta, tutkimuksessa käytetyistä homekannoista, avustamisesta useissa käytännön töissä, valokuvista, työn ohjaamisesta, kannustamisesta sekä ystävyydestä. Haluan kiittää myös tutkijatohtori Raimo Mikkolaa, Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos, kromatografi- ja massaspektrianalyyseistä, asiantuntemuksen ja tiedon jakamisesta sekä käytettyjen menetelmien kriittisestä tarkastelusta.

Lisäksi kiitän tohtorinkoulutettava Emmanuelle Castagnolia kaasukromatografianalyyseista ja tarvike-tilauksista, yli-insinööri Veli-Antti Hakalaa, laboratoriotyötekniikko Pertti Alhoa sekä laboratorioteknikko Lauri Sipilää teknisestä avusta laboratorio- ja kenttäkoelaitteistojen käytännön toteutuksessa, yliopisto-opettaja Henry Gustavssonin materiaalinäytteistä sekä tutkimusapulaisia, Olli Lipponen, Sander Toomla, Petri Jantunen ja Jenni Malinen, avustamisesta kenttäkoelaitteiden ja ohjelmistojen käytössä sekä kannustavasta ja mukavasta ilmapiiristä työhuoneessa.

Espoossa 14.5.2014

1 Johdanto

Homevaurio on rakenteellinen vika, jonka seurauksena haitallinen altistuminen homekasvustosta vapautuville biologisille epäpuhtauksille on todennäköistä. Terveyshaittoja aiheuttavat homevauriot rakennuksissa ovat yleinen ongelma ympäri maailmaa (Bornehag ym. 2001, s. 72). Uusien näytteenotto- ja mittausmenetelmien kehittäminen on välttämätöntä, koska nykymenetelmillä ei ole löydetty yhteyttä terveyshaittoihin. Home voi tuottaa aineenvaihdunnassaan toksineja ja kaasumaisia tuotteita, kuten haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) ja hiilidioksidia.

Rakennukset ovat usein suuria kokonaisuuksia. Menetelmiä tarvitaan paikantamaan kaikkein välittömimminkin toimenpiteitä vaativat tilat. Lisäksi tulee paikallistaa haittaa aiheuttava lähde. Kosteus- ja homevaurion aiheuttamille sisäilmahaittoille altistuu päivittäin noin 0,5–1 miljoonaa suomalaista (Eduskunnan tarkastusvaliokunta 2013). Kosteus- ja homevaurioituneiden ja sisäilmaongelmaisten rakennusten kuntotutkimuksista ja korjausmenetelmistä on julkaistu useita oppaita. Silti lukuisat sisäilmaongelmaisten rakennusten korjaukset ovat epäonnistuneet rakennuksen käyttäjien terveyshaitan poistamisessa. Sisäilmaongelma aiheutuu usein monien eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Haitan aiheuttajia voivat olla esimerkiksi myös pienhiukkaset, kuidut, viemärikaasut ja kemikaalit (Hänninen & Asikainen 2013, s.39; Salonen 2009; Reijula ym. 2012, s. 79).

Terveyshaittoja aiheuttavan mikrobiologisen olosuhteen selvittäminen perustuu rakennuksen tekniseen riskiarvioon ja kuntotutkimukseen, joissa kartoitetaan kosteus- ja homevaurioiden esiintyminen (Asikainen 2008, s. 14). Selkeissä kosteus- ja homevauriotapauksissa vaurioiden aiheuttaja on nopeasti löydettävissä ja aiheutuneet vauriot helposti todettavissa. Usein vaurio on kuitenkin rakenteen sisällä näkymättömissä, ja ainoastaan rakennuksen käyttäjien oireilu viittaa mikrobivaurioon (Kärki ym. 2006, s. 175; Pirinen 2006, s. 82). Tällöin nykykäytännön mukaan suositellaan sisäilmanäytteiden ottamista. Virallisia home- ja kosteusvaurioon viittaavia indikaattoreita ovat viitearvot ylittävät sieni-itiöpitoisuudet materiaali-, ilma- tai pintanäytteissä, sisäilmalle poikkeuksellinen sieni-itiöiden suku- tai lajijakauma sekä viitearvot ylittävä pitoisuus sisäilmanäytteen haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) kokonaismäärässä (STM 2008). Ohje- ja viitearvojen ylitykset eivät anna tietoa terveyshaitan aiheuttajista.

Hometoksiinit ovat yksi epäilty terveyshaittaoireiden aiheuttaja (Nielsen 2002). Toksiinien on esitetty kulkeutuvan kasvustosta itiöiden ja fragmenttien mukana sisäilmaan (Tuomi ym. 2000), mutta niiden kerääminen sisäilmasta on osoittautunut hankalaksi (Polizzi ym. 2009; Gottschalk ym. 2008). Kerätyt pitoisuudet ovat matalia ja analysointi kallista. Huonepölystä voidaan tehdä kokonaistoksisuustarkasteluja, mutta pölyn sisältämien muiden toksisuuslähteiden vuoksi menetelmää ei toistaiseksi suositella homevaurioindikaattoriksi (THL ym. 2012).

Homeiden VOC-tuotto on dynaamista ja vaihtelee suuresti kannan, olosuhteiden ja kasvuvaiheen mukaan. Yhdenkään VOC-yhdisteen ei ole todettu esiintyvän kaikissa rakennusmateriaaleilla kasvaneissa sekakasvustoissa ja siten sopivan

homeindikaattoriksi. Yleisimpiä yhdisteitä on löytynyt myös steriileiltä materiaaleilta. (Korpi ym. 1998.) Rakennuksen tilojen ajasta riippuvia VOC-profiileja ei ole käytetty sisäilmatutkimuksissa.

Homeiden hiilidioksidituoton taso vaihtelee riippuen kasvun vaiheesta, kosteusmuutoksista ja ravinteiden saannista. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuksia ei ole käytetty homekasvun toteamiseen. Sisätiloissa on myös muita hiilidioksidin tuottajia, kuten ihminen. Ilmanvaihto huuhtelee sisätiloja alentaen pitoisuuksia. Sen sijaan suljetussa rakenteessa korkea hiilidioksidipitoisuus voi ilmaista homekasvua. Hiilidioksidimittaus on nopea, ja tulos heti nähtävissä.

Työn tavoite oli kehittää menetelmiä paikallistamaan suurista homevaurioituneista rakennuskokonaisuuksista haitallisimmat tilat tai haitan lähde.

Tavoitteen saavuttamiseksi tutkittiin sisäilmahaittaista rakennusta monitieteisesti, hyödyntäen rakennusfysiikan, mikrobiologian, solutoksikologian ja kemian analytiikan menetelmiä. Työssä tutkittiin homeiden kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia aineenvaihduntatuotteita homevaurion indikaattoreina yksittäisin koejärjestelyin. Kehitettävien menetelmien tuli ilmaista tilojen käyttäjien hengitysilman laatua tai paikallistaa homevaurio ilman pitkää keräys- tai näytteenkäsittelyaikaa sekä olla lisäksi kvantitatiivisia ja toistettavia.

Uutena sisäilman näytteenottotekniikkana kehitettiin sisäilman vesihöyrykeräys kondensoimalla sisäilman vesihöyryä nesteeksi keräysastiaan. Menetelmää testattiin kenttäkokein. Kerättyjen nestenäytteiden toksisuutta tutkittiin solutoksikologisin menetelmin.

Kenttäkokeissa viljeltyjen homeiden nestemäisiä aineenvaihduntatuotteita kerättiin suoraan kasvatusmaljoilta. *Penicillium expansum* -homeen tuottamien nestemäisten emissioiden toksisuutta tutkittiin usealla eri indikaattorisolulla. Neste-emissioiden sisältämien toksiinien kulkeutumista ilmatilassa tutkittiin laboratoriokokeella.

Huoneilman VOC-profiilin kinetiikkaa tutkittiin kenttäkokeessa kahdella eri online-kaasusensorilla. Profiilin mukaan valittiin ajankohdat, jolloin huoneesta otettiin VOC-adsorbenttinäytteet kvantitatiivisia mittauksia (GC-MS) varten.

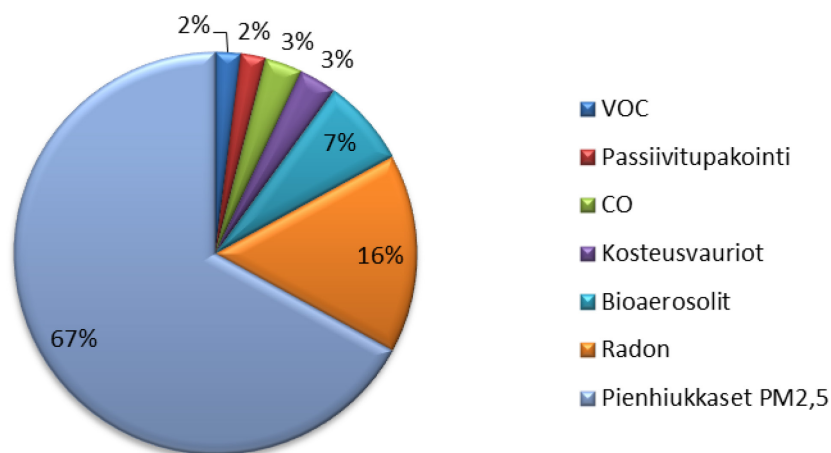
Homeen hiilidioksidituottoa rakenteiden sisällä simuloitiin laboratoriossa kammiokokein sisäilmasta eristetyillä homekannoilla, joita kasvatettiin kipsilevyalustoilla. Kenttäkokeessa mitattiin erään toimistohuoneen sisäseinärakenteesta hiilidioksidipitoisuus.

Rakennuksen eri tilojen eroja ja yhtäläisyyksiä homeiden tuottamien haitta-aineiden suhteen etsittiin sisätilahomeista jo julkaistulla menetelmällä (Andersson ym. 2012) kenttäkokeissa. Sisätilanäytteitä viljeltiin mallas-agar -maljoille, ja niistä neljässä viikossa kasvaneet pesäkkeet tutkittiin toksisuuden suhteen solutoksikologisin menetelmin.

2 Home rakennuksessa

2.1 Homevaurio osana sisäilmaongelmaa

Epäpuhtaan sisäilman aiheuttamaksi tautikuormaksi on arvioitu vuosittain EU:ssa yli 2 miljoonaa ja Suomessa 13 300 menetettyä tervettä elinvuotta. Ilmanvaihdon ja ilmavuotojen kautta sisäilmaan pääsevien ulkoilman epäpuhtauksien osuus tautitaakasta on arvioitu olevan noin 57,5 % ja sisälähteiden noin 42,5 %. Suurin sisäilman aiheuttama tautikuorma Suomessa on peräisin pienhiukkasista, noin 67 % kokonaiskuormasta, ja seuraavaksi suurin radonista, noin 16 %. Bioaerosolien ja kosteusvaurioiden osuus sisäilman aiheuttamasta tautikuormasta on arvion mukaan yhteensä noin 10 % (Kuva 1). (Hänninen & Asikainen 2013, s. 39.)



Kuva 1. Sisäilman aiheuttaman tautikuorman lähteet Suomessa 2010 (Hänninen & Asikainen 2013, s. 39).

Kosteusvaurio määritellään rakenteelliseksi viaksi, jonka seurauksena haitallinen altistuminen kosteusvaurioituneista rakenteista ja materiaaleista vapautuville kemiallisille, fysikaalisille ja biologisille epäpuhtauksille on todennäköistä. Homevaurio tarkoittaa haitallista homekasvustoa rakennuksissa. Pirisen (2006) väitöskirja-aineiston kosteus- ja homevaurioituneista taloista suurin osa vaurioista oli aiheutunut veden valumisesta rakenteisiin ja toiseksi suurin vaurioitumistapa oli kapillaarisuuden takia siirtynyt kosteus.

Kosteus- ja homevaurio voi kehittyä nopeasti esimerkiksi putkivuotojen seurauksena tai hitaasti pitkäaikaisen haitallisen kosteuden kertymisen seurauksena. Vaurioiden syitä voivat olla kosteusvaurioille alttiit rakenteet ja materiaalit, rakentamisen huolimattomuus, työmaasuojauksen puutteellisuus, rakentamisen virheellinen toteutus ja kiinteistön huollon laiminlyönti. Homekasvua esiintyy rakenteissa sekä pintamateriaaleissa. (Pirinen 2006, s. 81.)

Eduskunnan tarkastusvaliokunnan teettämän selvityksen mukaan kosteus- ja homevaurion aiheuttamille sisäilmahaitoille altistuu päivittäin noin 0,5 – 1 miljoonaa suomalaista. Kosteus- ja homeongelmien talousvaikutusten arvioidaan olevan

rakennuskustannusten osalta noin 21,4 mrd. euroa ja työpanos- ja hoitokustannusten osalta 36,6 mrd. euroa. (Eduskunnan tarkastusvaliokunta 2013.)

Kosteus- ja homevaurioituneiden sekä sisäilmaongelmaisten rakennusten kuntotutkimuksista ja korjausmenetelmistä on julkaistu oppaita ja ohjeita (Ympäristöministeriö 1997a; Ympäristöministeriö 1997b; Kärki ym. 2006; Asikainen & Peltola 2008; Kärki & Öhman, 2007). Tästä huolimatta lukuisat sisäilmaongelmaisten rakennusten korjaukset ovat epäonnistuneet eikä käyttäjien oireilu ole korjaustoimenpiteistä huolimatta poistunut (Putus 2013). Ei tiedetä, mitä sisäilmaongelmaisesta rakennuksesta kannattaa ja tulee mitata vaurion paikallistamiseksi sekä korjausten onnistumisen varmistamiseksi. Tästä syystä uusien mittausten menetelmien tarve on ilmeinen.

2.2 Homevaurion paikallistamisen nyky menetelmät

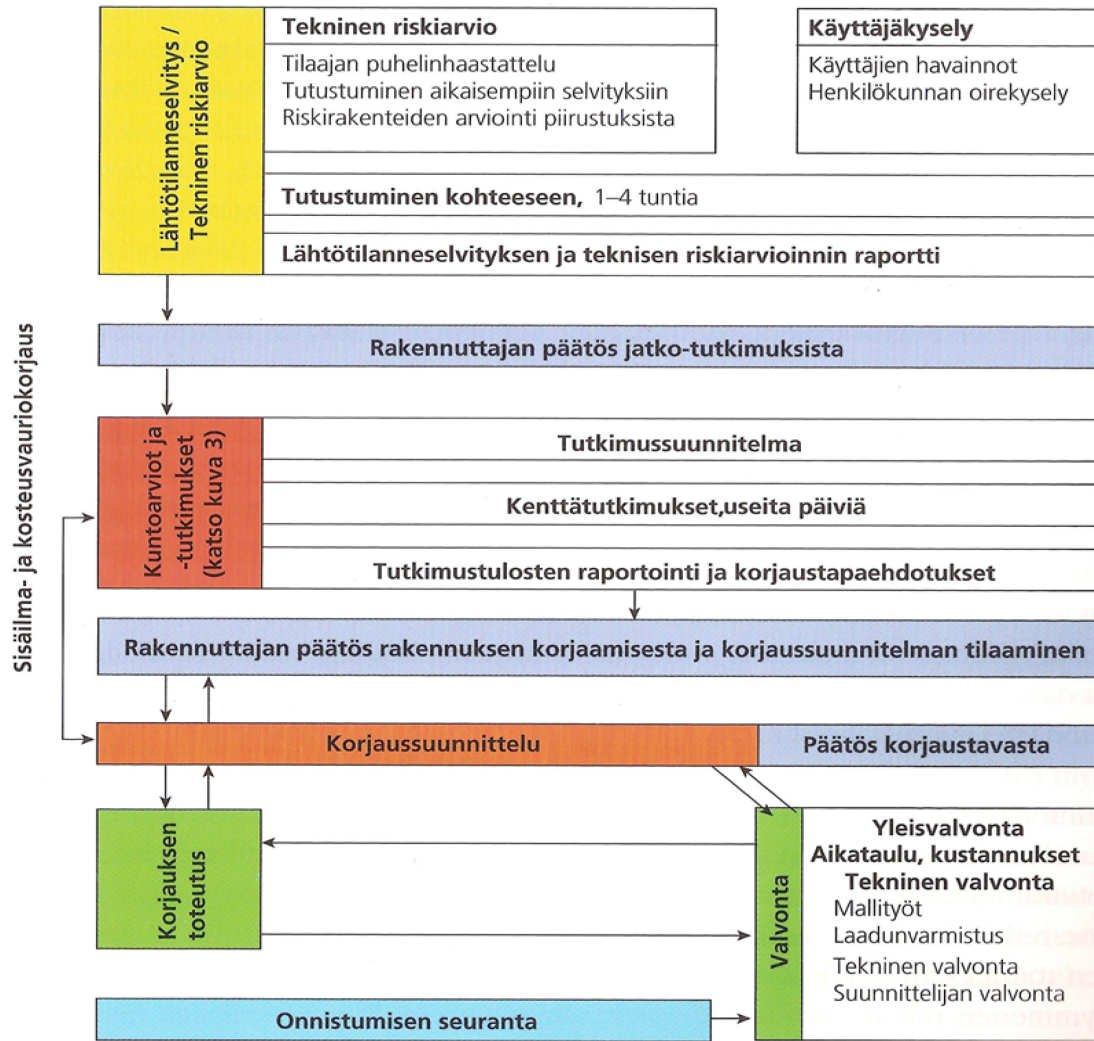
2.2.1 Sisäilmaongelmaisen rakennuksen tutkimuksen vaiheet

Tilan käyttäjien oireilun synnyttämän terveyshaittaa aiheuttavan mikrobiologisen olosuhteen selvittäminen perustuu rakennuksen tekniseen riskiarvioon ja kuntotutkimukseen, joissa kartoitetaan kosteus- ja homevaurioiden esiintyminen. Kaavio rakennuksen kunnon arvioinnista ja korjaamisen prosessista sisäilmasto- ja kosteusvauriokohteissa on kuvassa 2.

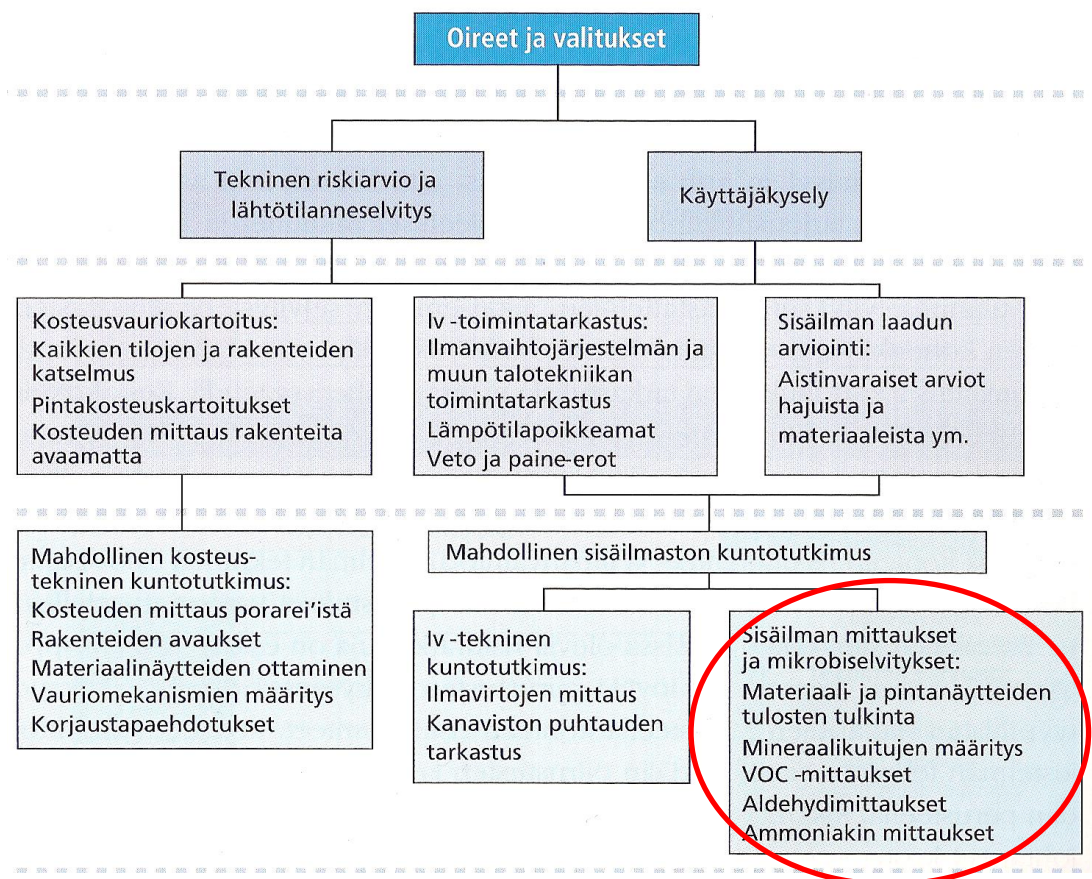
Selkeissä kosteus- ja homevauriotapauksissa vaurioiden aiheuttaja on nopeasti löydettävissä ja aiheutuneet vauriot helposti todettavissa. Usein vaurio on kuitenkin rakenteen sisällä näkymättömissä, ja ainoastaan rakennuksen käyttäjien oireilu viittaa mikrobivaurioon (Kärki ym. 2006, s. 175). Tällöin sosiaali- ja terveysministeriön ohjeistuksen mukaan on tarpeellista määrittää sisäilman, pintanäytteen tai rakennusmateriaalien sieni-itiöpitoisuus sekä mikrobisuvusto (STM 2003, s. 72). Esimerkiksi Pirisen (2006, s. 82) väitöskirja-aineiston mikrobivaurioituneissa pientaloissa noin joka kolmas vaurio oli rakenteiden sisällä siten, että siitä ei ollut näkyvissä silmin havaittavaa merkkiä, vaan sen löytämiseen tarvittiin kuntotutkimustoimenpiteitä kuten kosteusmittauksia porarei'istä, rakenteiden avaamista tai mikrobinäytteiden ottamista.

2.2.2 Sisäilman mikrobimittaukset

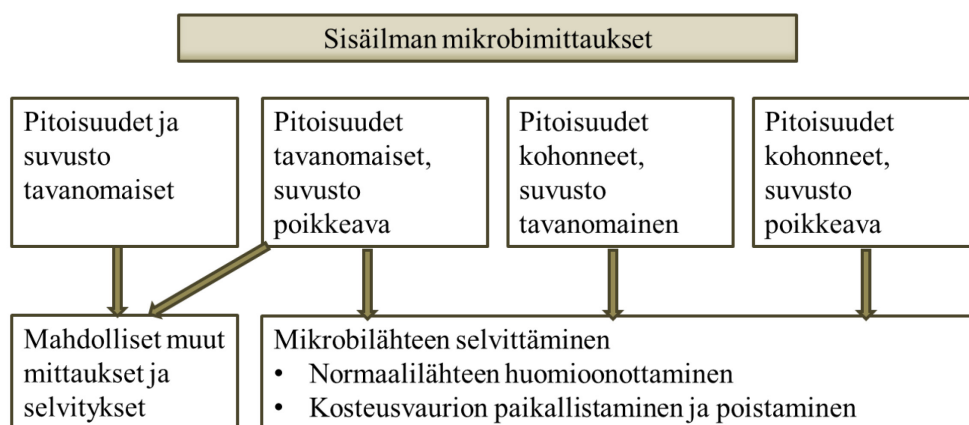
Sisäilman mittaukset ja mikrobimääritykset osana rakennuksen kunnon arviointia ja tutkimista on esitetty kuvassa 3. Mikrobipitoisuuksien ja -suvuston huomioiminen tuloksia tulkittaessa on esitetty kuvassa 4.



Kuva 2. Rakennuksen kunnon arvioinnin ja korjaamisen prosessi sisäilmasto- ja kosteusvauriokorjauksissa (Asikainen 2008, s. 14).



Kuva 3. Rakennuksen kunnon arvioinnin ja tutkimisen vaiheet (Asikainen 2008, s. 16). Sisäilman mittaukset ja mikrobiselvitykset osana arviointia ja tutkimista on ympyröity kuvassa punaisella.



Kuva 4. Mikrobipitoisuuksien ja -suvuston huomioiminen sisäilmanäytteiden mikrobituloksia tulkittaessa (STM 2008, s. 170).

2.2.3 Sieni-itiöpitoisuus homevaurion indikaattorina

Sisäilmamittauksista ainoat viralliset haitallisen mikrobikasvuston indikaattorit ovat Asumisterveysohjeen (STM 2003) mukaisin menetelmin otettujen näytteiden viitearvot ylittävä pesäkelukumäärä sekä näytteiden sisältämät vaurioindikaattorimikrobit. Sisäilman mikrobimittauksilla tutkitaan, ovatko sisäilman sieni-itiöpitoisuudet ja -suvusto tavanomaisia rakennuksen sijaintiin, ikään ja vuodenaikaan nähden.

Sieni-itiöpitoisuus ilmoitetaan pesäkelukumääränä (cfu *colonies forming unit* tai pmy *pesäkkeitä muodostavaa yksikköä*) kuutiomäärässä ilmaa tai neliösenttimetrissä materiaali- tai pintanäytettä. Laajojakaan mikrobivaurioita ei kuitenkaan välttämättä havaita pesäkelukumääriä laskettaessa (Häkkilä 2012, s. 174). Tämän vuoksi yksittäiset sisäilmamittaukset eivät poissulje vaurion mahdollisuutta ja eikä niitä siten pidä käyttää rakennuksen terveellisyysosoittamiseen.

Sieni-itiöpitoisuuden mittaamisessa käytetään 2- tai 6-vaiheimpaktoria, jolla näytteenottoajasta, tavanomaisesti 10–15 minuuttia, riippuen saadaan ilmatilavuudeltaan 0,28–0,42 m³ suuruinen hetkellinen ilmanäyte. Selvän mikrobilähde-epäilyn tai sulan maan aikana otetun näytteen keruuaikaa lyhennetään. Keräin lajittelee mikrobit ilmanäytteen aerodynaamisen koon mukaan kasvatustaljoille, joilta seitsemän vuorokauden kasvatusajan jälkeen lasketaan homeiden pesäkeluku. Sosiaali- ja terveysministeriön ohje- ja viitearvot sisäilman bioaerosoleille asuintiloissa on esitetty taulukossa 1. Toimistotiloissa sovellettava ohjeellinen viitearvo on 50 pmy/m³ (Työterveyslaitos 2011).

Taulukko 1. Tavanomaisesta poikkeavat mikrobipesäkelukumäärät asuinrakennuksissa (STM 2008, s. 169–171). pmy = pesäkettä muodostavaa yksikköä.

Näyte	Tavanomaisesta poikkeava sieni-itiöpitoisuus näytteessä	Yksikkö
Rakennusmateriaali	> 10000	pmy/g
Pintanäyte	> 1000	pmy/cm ²
Sisäilmanäyte	> 500	pmy/m ³

Mikrobipitoisuutta on käytetty korjausten onnistumisen arvioinnissa ja seurannassa. Sieni-itiöpitoisuuksissa on todettu eroja vaurio- ja vertailukohteissa sekä muutoksissa ennen ja jälkeen korjauksen (Lignell ym. 2006, s. 210). Toisaalta esimerkiksi pian tiivistyskorjausten ja homesiivouksen sekä mahdollisten biosidien käytön jälkeen otetut ilmanäytteet eivät välttämättä anna oikeaa kuvaa haitan poistumisesta.

2.2.4 Sisäilmalle poikkeuksellinen sieni-itiöiden suku- tai lajijakauma homevaurion indikaattorina

Sisäilman poikkeuksellinen sieni-itiöiden suku- tai lajijakauma voi myös viitata homevaurioon. Yleisin ja runsaimmin esiintyvä sienisuku sisäilmassa on *Penicillium*. Muiden kuin *Penicillium*-sienten esiintymistä valtalajina sisäilmanäytteissä voidaan pitää epätavanomaisena. Ulkoilman yleisin sienisuku on *Cladosporium*, minkä vuoksi *Cladosporium*-lajeja havaitaan yleisesti myös sisäilmassa, varsinkin syksyisin ja kesäisin. Rakennusten sisäilma-, pinta- ja rakennusmateriaalinäytteissä esiintyy tavallisimmin *Penicillium*-, *Aspergillus*- ja *Cladosporium*- sienisukuja sekä hiivoja. (STM 2003, s. 81.)

Asumisterveysohjeen mukaan kosteusvaurioon viittaavia mikrobisukuja, -lajeja ja -ryhmiä on taulukossa 2. Lisäksi asiantuntijalaboratoriot ovat laatineet tutkimustulostensa ja kokemuksensa perusteella useita indikaattorimikrobiluetteloita, joita päivitetään.

Taulukko 2. Kosteusvaurioon viittaavia mikrobisukuja, -lajeja ja -ryhmiä. Tähdellä merkityt ovat mahdollisia toksiinintuottajia (STM 2003, s.82).*

Kosteusvaurioon viittaavia mikrobisukuja ja -lajeja	Mahdollinen toksiinintuottaja
<i>Stachybotrys</i>	*
<i>Trichoderma</i>	*
<i>Aspergillus versicolor</i>	*
<i>Aspergillus fumigatus</i>	*
<i>Chaetomium</i>	*
<i>Phialopbora</i>	
<i>Fusarium</i>	*
Aktinomykeetit	*

Työterveyslaitos suosittelee rakenteiden korjausta viipymättä ja tilojen käyttökiellon tapauskohtaista harkintaa, mikäli sisätilasta löydetään toksiineja tuottavia mikrobilajeja (TTL 2013).

Näytteiden virallisen ohjeen mukainen kasvatusaika on yksi viikko. Tämä ei ole riittävän pitkä aika kaikkien homeiden itiöinnin alkamiseen, jolloin tunnistaminen ei ole mahdollista. Suku tai laji ilmoitetaan tällöin ilmaisulla ”steriilit” , *mycelia sterilia*. Esimerkiksi toksiinintuottaja *Penicillium expansum* vaatii noin neljän viikon kasvatusajan ja jää tunnistamatta.

2.3 Homeiden kasvu ja kulkeutuminen rakennuksissa

2.3.1 Olosuhteet homekasvulle rakennuksessa

Sisäilmaongelmaisissa rakennuksissa ja tiloissa on todettu esiintyvän valtalajistoina toksiinintuottokykyisiä homekantoja, kun taas luonnossa toksiinintuottajat ovat harvinaisia (Andersson 2014). Homeet ovat monisoluisina rihmastoina kasvavia sieninä, jotka hyödyntävät tehokkaasti ympäristönsä orgaanisia yhdisteitä ja sopeutuvat nopeasti uusien yhdisteiden käyttöön. Sopeutumiskyvyn sekä tehokkaan lisääntymisen ja itiöiden tuotannon avulla homeet ovat levittäytyneet kaikkialle. Samat kemialliset ja fysikaaliset elinolosuhteet saattavat olla hyödyllisiä yhdelle ja haitallisia toiselle lajille. Tämä vaikuttaa lajien valikoitumiseen ympäröivien olosuhteiden mukaan. Rakennuksien ja rakenteiden ympäristöolosuhteet poikkeavat luonnosta esimerkiksi kosteuden, lämpötilan, hiilidioksidipitoisuuden, ravinteiden ja kemikaalikuorman suhteen. Lisäksi sisätiloista puuttuvat auringonvalon, sateen ja tuulen vaikutukset.

Kosteuden merkitys homekasvulle

Ilman vettä ei ole homeen kasvua. Vesi voi olla saatavilla monin eri tavoin ja eri muodoissa ja eri lähteistä. Ajasta riippuvat muutokset kosteustasossa, lämpötilassa ja ilman liikkeissä vaikuttavat sekä homeen kasvun biologiseen systeemiin, että materiaalien, rakenteiden ja rakennusten fysikaaliseen systeemiin. Tyypillisesti ympäröivien lämpö- ja kosteusolosuhteiden vaihtelu voidaan jakaa kahteen ryhmään. Ensimmäiseksi pitkän aikavälin vaihtelu vuosisitasolla ja syklinen muoto, joka on riippuvainen vuodenaajoista. On selvää, että maantieteellinen sijainti vaikuttaa ulko-olosuhteisiin, esimerkkeinä manner-, meri ja arktinen ilmasto. Toiseksi lyhyen aikavälin vaihtelu, joka johtuu usein tilan käytöstä, kuten ruuanlaitto, suihku, lämmitys ja jäähdytys. Sisä- ja ulko-olosuhteiden kosteuspitoisuuserot ja -vaihtelu sekä lämpötilaerot rakennuksen vaipan yli aiheuttavat rakenteen sisällä sekä paikallisia eroja että ajasta riippuvaa värähtelyä suhteellisessa kosteudessa (Kuva 5).

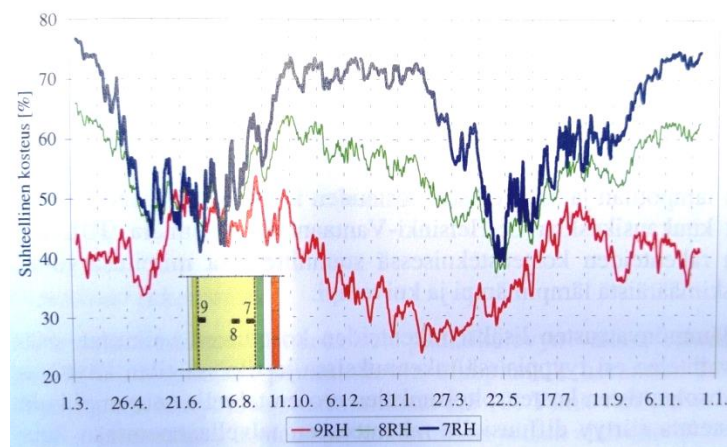
Vesi materiaalissa voidaan ilmaista erilaisilla parametreilla, kuten veden aktiivisuus, osmoottinen paine, vesipotentiaali ja vesipitoisuus. Viimeinen osoittaa vesimäärää ja edelliset perustuvat kemialliseen potentiaaliin ja ovat termodynaamisia suureita. Mikrobiologiassa käytetään vesiaktiivisuutta (a_w) ja rakennustekniikassa ilman suhteellista kosteutta (RH) kuvaamaan veden saannin olosuhteita homekasvun kannalta. Homeiden kasvulle olennaista on vapaan veden saanti. Vapaa vesi eli veden aktiivisuus a_w edustaa käytettävää veden määrää ympäristössä, ei kokonaisvesipitoisuutta. Mitä enemmän veteen on liuenneena kemiallisia aineita, sitä pienempi on veden aktiivisuus. Veden aktiivisuus voi saada arvon välillä 0 – 1.

Yleensä solun sisältö on ympäristöä väkevämpää, jolloin vesi pyrkii diffundoitumaan soluun. Ympäristössä, jonka vesiaktiivisuus on matala, tilanne pyrkii kääntymään päinvastaiseksi. Useat mikrobilajit elävät $a_w > 0,9$ pitoisuuksissa, mutta esimerkiksi monille *Aspergillus*-homeille vapaan veden tarve on $a_w > 0,7$. RH [%] taas on todellisen vesipitoisuuden suhde ilman lämpötilasta riippuvaan maksimivesipitoisuuteen höyryssä. Tasapainotilassa materiaalin vesiaktiivisuus a_w

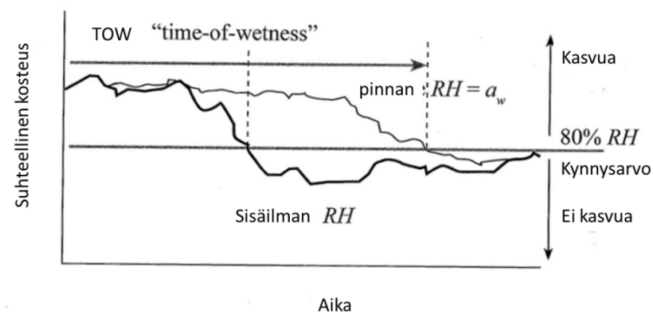
vastaa suhteellista kosteutta RH siten, että $a_w = RH/100 \%$. (Adan & Samson 2011, s. 22–26.)

Homeen kasvulle merkittävää on se aika, jolloin kasvualustan kosteusolosuhde on kasvulle otollinen (TOW, Time-of-wetness), (Kuva 6). Suhteellinen kosteus materiaalissa voi olla huomattavasti sisäilman suhteellista kosteutta korkeampi pitkään hetkellisen kosteuskuorman jälkeen riippuen materiaalin fysikaalisista ominaisuuksista kuten kapillaarisuus ja absorptio. (Adan ym. 2011, s. 56–61.)

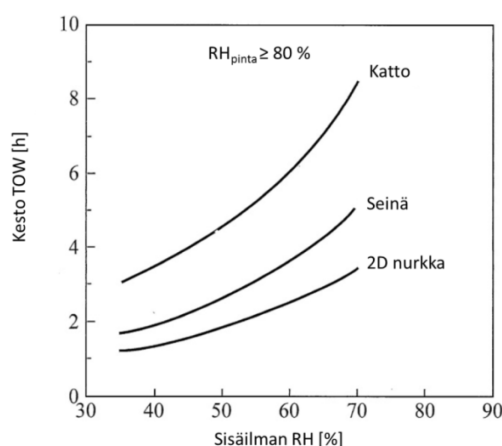
Kipsilevyllä esimerkiksi materiaalin huokoisuuden ja absorptiokyvyn vuoksi pinnan suhteellinen kosteus pysyy homekasvulle otollisena (TOW) useita tunteja lyhyen kosteuskuorman jälkeen, vaikka sisäilman suhteellinen kosteus laskee ilmanvaihdon vaikutuksesta homekasvulle otollisia olosuhteita matalammaksi (Kuva 7).



Kuva 5. Erään seinärakenteen mitatut suhteelliset kosteudet (RH) rakenteen eri osissa 1.3.1999–31.12.2000. Mittauspisteet ovat ilmansulkupaperin ja lämmöneristeen rajapinta (piste 9), eristeen sisäosa (piste 8) ja lämmöneristeen ulkopinta (piste 7). (Kauriinvaha ym. 2001, s. 21.)



Kuva 6. Periaatekuva homekasvulle otollisen kosteuden ajasta TOW (Time-of-wetness) materiaalin pinnalla kosteuskuorman jälkeen (Adan ym. 2011, s. 58).



Kuva 7. Kipsilevyn pinnan TOW (Time-of-wetness) [h] 10 minuutin suihkun jälkeen sisäilman suhteellisen kosteuden funktiona seinässä, katossa ja nurkassa (Adan ym. 2011, s. 58).

2.3.2 Rakennuksissa yleiset homelajit

Adams ym. (2013) tutkimuksessa yhtäkään sientä ei tunnistettu sisäilma- tai huonetyyppi-indikaattoriksi, vaan sisäilman sieneliöstö vaihteli kosteusvaurioitumattomissa rakennuksissa kuten ulkoilman lajit vuodenajan mukaan. Lisäksi tutkimuksessa todettiin, että rakennuksen maantieteellinen sijainti oli eliöyhteisörakenteen yksittäinen ratkaiseva tekijä. Tutkimuksen mukaan homeiden koosta tai määrästä riippumatta hajaantuminen rajoittui alle neliökilometrin alueelle.

Rakennusmateriaaleissa on valmiiksi eri homelajeja. Nielsen (2002) on osoittanut mikrobien kasvamisen rakennusmateriaaleilla. Hyvärinen ym. (2002) tutkimus vahvistaa, että mikrobikasvua tapahtuu monilla eri rakennusmateriaaleilla ja osoittaa yhteyden joidenkin rakennusmateriaalien ja sienisukujen välillä. Tutkimuksessa määritettiin mikrobikoostumus 1140 silminnähden kosteusvaurioituneesta rakennusmateriaalinäytteestä, jotka oli kerätty erilaisista rakennuksista ympäri Suomea. Korkeimmat sieni-itiöpitoisuudet todettiin puu- ja paperimateriaaleissa ja matalimmat pitoisuudet mineraalieristeissä, keraamisissa tuotteissa sekä maaleissa ja liimoissa. Suuri variaatio sienissä löydettiin puumateriaaleista, joissa esiintyi useimmiten *Penicilliumia* ja hiivoja. Paperimateriaaleilla suuri ero puumateriaaleihin oli *Cladosporiumin* ja *Stachybotryksen* esiintyminen. Kipsilevylle oli ominaista *Stachybotryksen* yleisyys. Keraamiset tuotteet ja maalit ja liimat suosivat *Acremoniumia* ja *Aspergillus versicoloria*. Betoniin ja alapohja-rakenteisiin on yhdistetty useat *Aspergillus*-lajit sekä *Chaetomium* sp (Andersen ym. 2001). Joidenkin rakennuksissa yleisesti esiintyvien homelajien luontaiset kasvu ympäristöt sekä yleiset kasvualustat rakennuksissa on koottu taulukkoon 3.

Taulukko 3. Joidenkin rakennuksissa esiintyvien homelajien luontainen kasvuympäristö sekä yleinen kasvualusta rakennuksissa (Nielsen 2002, s. 3, 4).

Suku	Laji	Luontainen kasvu- ympäristö	Yleinen rakennus- materiaalialusta
<i>Chaetomium</i>	<i>globosum</i>	Maaperä, olki, puu	Puu ja selluloosaa sisältävät materiaalit
<i>Stachybotrys</i>	<i>chartarum</i>	Heinä, olki, paperi, maaperä	Kipsilevyt, putkien eristeet
<i>Ulocladium</i>	<i>chartarum</i> ja <i>atrum</i>	Maaperä, lanta, ruoho	Puu, tapetit, kipsilevyt
<i>Trichoderma</i>	<i>harzianum</i> , <i>citrinoviride</i> , <i>atroviride</i> ja <i>longibrachiatum</i>	Märkä puu, maaperä	Puu
<i>Alternaria</i>	<i>tenuissima</i>	Viljakasvit, lehdet	Tapetit, kipsi
<i>Aureobasidium</i>	<i>pullulans</i>	Maaperä, viljakasvit	Maalit
<i>Rhodulotorula</i>	<i>rubra</i>		Maalit, puu
<i>Phoma</i>	<i>sp.</i>		Maalit, puu, tapetit, tiivisteet
<i>Aspergillus</i>	<i>versicolor</i>	Juusto, viljakasvit, mausteet, kuivatut lihatuotteet	Useat materiaalit, päälöydöksiä, kasvaa pölyssä
<i>Penicillium</i>	<i>chrysogenum</i>	Useat ruoka-aineet, mausteet, kuivat viljatuotteet	Kaikki materiaalit
<i>Penicillium</i>	<i>brevicompactum</i>	Maaperä, pähkinät, hedelmät, mehut	Puumateriaalit
<i>Penicillium</i>	<i>corylophilum</i>	Useat ruoka-aineet	Useat materiaalit, päälöydöksiä
<i>Aspergillus</i>	<i>sydowii</i>	Maaperä, puuvilla, pavut, pähkinät, olki	Useat materiaalit, päälöydöksiä
<i>Aspergillus</i>	<i>ustus</i>	Maaperä, viljatuotteet, maapähkinät	
<i>Cladosporium</i>	<i>sphaerospermum</i>	Kuolleet kasvit	Maalit, puu, tapetit, tiivisteet
<i>Cladosporium</i>	<i>herbarum</i>	Kuolleet kasvit, säilötyt hedelmät	Maalit, puu, tapetit, tiivisteet
<i>Penicillium</i>	<i>palitans</i>	Juusto, puu	Useat materiaalit, erityisesti puu
<i>Eurotium</i>	<i>repens</i>	Kakut, kuivatut ruoat, viljatuotteet	
<i>Wallemia</i>	<i>sebi</i>	Kuivatut ruoat, kakut, suolattu kala, sokeri, suklaa	
<i>Paecilomyces</i>	<i>variotii</i>	Komposti	
<i>Penicillium</i>	<i>polonicum</i>	Vilja- ja lihatuotteet	
<i>Aspergillus</i>	<i>niger</i>	Kuivattu ruoka, mausteet	
<i>Penicillium</i>	<i>expansum</i>	Pähkinät, omenat	Puu

2.3.3 Homeiden kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa

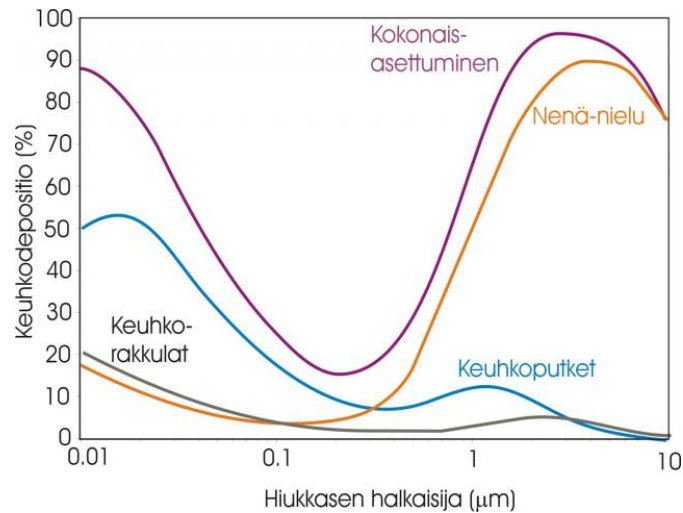
Rakennusmateriaaleissa on eri homelajeja johtuen mikrobien kyvystä levittäytyä kaikkialle. Homeitiötä saattaa kulkeutua sisätiloihin myös rakenteiden läpi esimerkiksi rakennuksen alustan maaperästä tai seinän eristetilasta, mikäli rakenteet eivät ole tarpeeksi tiiviit ja sisätilat ovat alipaineiset ulkoilmaan nähden. Taneli Päckilän diplomityössä todettiin, ettei alipaineistus lisännyt merkittävästi mikrobipitoisuuksia sisäilmassa. Sen sijaan alipaineistus lisäsi mikrobilajistoa sisäilmassa, ja kosteusvaurioihin viittaavia lajeja löytyi selkeästi enemmän. Työssä verrattiin mikrobipitoisuuksia ja -lajistoa normaalikäyttötilanteessa sekä 10 Pa ja 20 Pa alipaineissa. (Päckilä 2012.)

Kosteus vaikuttaa mikrobiemissioihin (Kymäläinen ym. 2005, s. 130). Ilman virtausnopeuden kasvu ja suhteellisen kosteuden aleneminen vaikuttavat itiöiden irtoamiseen ilmapvirtausten mukana (Menetrez & Foarde 2004, s. 77). Suhteellisen kosteuden aleneminen vaikuttaa myös kasvustosta irronneiden fragmenttien kokoon siten, että alhaisessa kosteudessa fragmentit ovat pienempiä ja suurempi joukko irronneista fragmenteista on kooltaan hengitysteihin tunkeutuvia (Frankel ym. 2013, s. 21).

Homeitiöt sisäilmassa ovat aerosolihiukkasia. Ilmassa leijuvat aerosolihiukkaset liikkuvat pääasiassa ilmapvirtausten mukana. Hiukkasen kyky seurata ilmapvirtausta riippuu sen inertiaasta eli massan hitaudesta. Mitä pienempi hiukkanen, sitä herkemmin se reagoi ilmapvirtauksen muutoksiin. Hiukkasten viipymäaika ilmassa riippuu depositiomekanismien tehokkuudesta.

Aerosolihiukkasen putoamisnopeus riippuu vahvasti hiukkasen aerodynaamisesta halkaisijasta: 100 μm kokoinen hiukkanen putoaa keskimäärin nopeudella 25 cm/s, 10 μm kokoinen nopeudella 3 mm/s ja 1 μm kokoinen enää nopeudella 0,03 mm/s. Pienhiukkasten, alle 2,5 μm , putoamisnopeudet ovat niin pieniä, että sedimentaatio on täysin merkityksetöntä ilmapvirran liikkeisiin ja diffuusioon verrattuna. Karkeille hiukkasille sedimentaatio on kuitenkin merkittävä depositiomekanismi. (Riipinen & Lehtipalo, 2013.) Homeitiöiden halkaisija on noin 2–10 μm (Burke, 2006). Pintapölynäytteet ovat sedimentaation takia pinnalle laskeutuneita karkeita hiukkasia.

Hengitettyjen hiukkasten terveysvaikutukset riippuvat niiden fysikaalisista ja kemiallisista ominaisuuksista sekä siitä, mihin kohtaan hengityselimistöä ne deposoituvat. Hiukkasen halkaisijan merkitys keuhkodepositioon on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Hiukkasen halkaisijan merkitys keuhkodepositioon. (Riipinen & Lehtipalo 2013).

Hengitetyistä itiöistä 90 % jäisi kokonsa puolesta nenä-nieluun. Ylähengitysteiden ja keuhkoputkien pintaa peittävät värekarvat, jotka kuljettavat niihin tarttuneet hiukkaset liman mukana pois hengityselimistöä muutamassa tunnissa. Keuhkorakkuloihin asti päätyneet liukenemattomat hiukkaset puolestaan poistuvat hitaasti, vasta kuukausien tai vuosien kuluessa makrofagien nielemänä tai kuljetettuina imusolmukkeisiin. Liukenevat tai ultrapienet hiukkaset taas voivat imeytyä keuhkorakkuloista verenkiertoon. (Riipinen & Lehtipalo 2013.)

3 Homeiden aineenvaihduntatuotteet homevaurion indikaattorina

3.1 Mikrobiperäiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet (MVOC)

3.1.1 Ominaisuudet

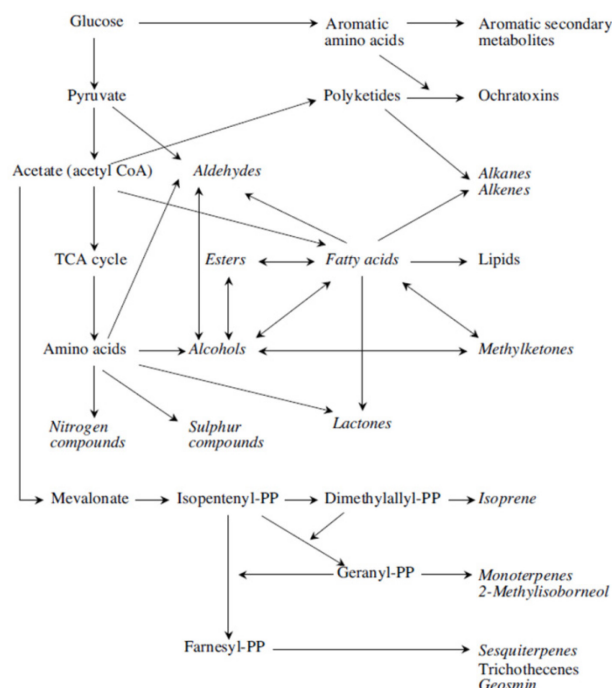
Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ovat hiilipohjaisia kiinteitä tai nestemäisiä yhdisteitä, joiden höyrynpaine on yli 0,01 kPa, kun lämpötila on 20°C, tai joilla on vastaava haihtuvuus tietyissä käyttöolosuhteissa (YK 2003, s. 18). MVOC:t ovat mikro-organismien kuten sienten ja bakteerien haihtuvia orgaanisia aineenvaihduntatuotteita eli metaboliitteja. Niitä muodostuu sekä primääri- että sekundäärimetaboliassa (Kuva 9). Mikro-organismien primäärimetabolia tarkoittaa solujen kasvuun ja elintoimintoihin tarvittavien aineiden tuottoa. Sekundäärimetabolia tarkoittaa aineenvaihduntaa, joka ei palvele välitöntä solujen kasvua tai uusiutumista.

Sienien tuotteista on identifioitu noin 250 eri MVOC-yhdistettä. Identifioidut MVOC:t ovat alkoholeja, ketoneja, terpeenejä, estereitä, laktoneita, hiilivetyjä sekä rikki- ja typpiyhdisteitä. (Korpi ym. 2006, s. 1.) Liitteessä A on 96 tunnistettua MVOC:ia ja niiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. VOC-tuotto on biologisesti dynaamista. Tietyn lajin tai kannan VOC-profiili vaihtelee kasvualustan, itämisajan, ravintoaineiden, lämpötilan, suhteellisen kosteuden (Pasanen ym. 1997, s. 429; Polizzi ym. 2012, s. 279–283) ja muiden ympäristöparametrien mukaan (Sunesson ym. 1997; Fiedler ym. 2001; Matysik ym. 2008).

MVOC-tuotto riippuu myös mikrobin kasvuvaiheesta. *Aspergillus flavuksella* tehdyt testit ovat osoittaneet MVOC-tuoton, erityisesti terpeenien ja seskviterpeenien osalta, olevan suurimmillaan juuri ennen itiömuodostumista ja itiöinnin aikana sekä hometoksiinien tuoton aikana (Zeringue ym. 1993, s. 2269). Yleisesti olosuhteet, jotka suosivat mikrobikasvua, suosivat myös sekundäärimetaboliitteja, mutta toisaalta tämä ei päde kaikkiin yksittäisiin sekundäärimetaboliitteihin (Kuske ym. 2005, s. 825).

3.1.2 VOC-tuotto rakennusmateriaalialustalla

Tutkimuksissa ei ole toistaiseksi osoitettu minkään MVOC:in esiintyvän kaikissa eri lajien mikrobikasvustoissa. Esimerkiksi Korpi ym. (1998) eivät löytäneet sellaista ainetta, joka olisi esiintynyt kaikissa tutkituissa mikrobisekakasvustoissa rakennusmateriaalilla. Vaikka joitakin mahdollisia homekasvuindikaattoreita löytyi, niin niistä jokaista emittoitui myös steriileistä materiaaleista (Pasanen ym. 1998, s. 705). Useimmin raportoidut MVOC:it on koottu taulukkoon 4.



Kuva 9: Pääasiallinen metaboliapolku joillekin MVOC:eille ja hometoksiineille. Haihtuvat yhdisteet on kirjoitettu kursivilla. (Korpi ym. 2006, s. 3.)

Taulukko 4. Kirjallisuustutkimuksissa useimmiten raportoidut MVOC:it (Kuske ym. 2005, s. 826), esiintyminen rakennusmateriaaleissa, CAS-numerot, molekyylipainot ja kiehumispisteet.

Kemiallinen ryhmä	Yhdiste	Löytynyt myös steriilistä rakennusmateriaalinäytteestä*	CAS**	g/mol***	Kiehumispiste***
Alkoholit	2-metyyli-1-propanoli	X	78-83-1	74,1	108
	3-metyyli-1-butanoli	X	123-51-3	88,2	132
	2-metyyli-1-butanoli		137-32-6	88,2	128
	3-oktanoli		589-98-0	130,2	174
	1-okten-3-oli	X	3391-86-4	128,2	84
	1-heksanoli	X	111-27-3	102,2	157
	1-pentanol	X	71-41-0	88,2	138
	2-metyyli-isoborneoli		2371-42-8	168,3	
Terpeenit	Limoneeni	X	138-86-3	136,2	176
	Pineenit	X		136,2	155 ja 166
	Geosmiini		19700-21-1	182,3	
Ketonit	3-oktanoni	X	106-68-3	128,2	168
	2-heptanoni	X	110-43-0	114,2	150
	2-pentanoni	X	107-87-9	86,1	102
Furaanit	3-metyylifuraani		930-27-8	82,1	66
Rikkiyhdisteet	Dimetyylisulfidi		75-18-3	62,1	37,3

* (Pasanen ym. 1998, s. 705), ** (NLM, 2014), *** (Database, 2014).

3.1.3 Kaasumaisten aineiden kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa

Rakennusmateriaalissa kasvavien homeiden tuottamia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä vapautuu kasvustosta ympäröivään ilmaan. Päästönopeus riippuu yhdisteen höyrynpaineesta materiaalin pinnalla, yhdisteen höyrynpaineesta ympäröivässä ilmassa sekä massansiirtokertoimesta kaavan 1 mukaan.

$$E = k * (v_{p,pinta} - v_{p,ilma}) \quad (1)$$

jossa E on emissionopeus [$\text{g}/(\text{m}^2\text{h})$]
 k on massansiirtokerroin [m/s]
 $v_{p,pinta}$ on höyrynpaine materiaalin pinnalla [$\text{Pa} = \text{kg}/(\text{ms}^2)$]
 $v_{p,ilma}$ on höyrynpaine ympäröivässä ilmassa [Pa].

Aineen höyrynpaine on suoraan verrannollinen sen pitoisuuteen ilmassa. Haihtuminen riippuu pitoisuuserosta materiaalin pinnalla suhteessa ympäröivään ilmaan. Emittoituneen aineen siirtyminen rakenteesta tapahtuu diffuusio- ja konvektioilmioiden kautta (Aikivuori 2001, s. 9). Diffuusiolla molekyylit siirtyvät rajapinnan yli joko ilmatilaan tai toiseen materiaaliin diffuusiokertoimensa mukaisesti ja suhteessa pitoisuusgradienttiin. Konvektiossa aine siirtyy konvektiovirtausten, kuten ilmavuotojen kautta rakenteesta sisäilmaan. Ilmanvaihto laimentaa sisäilmaan emittoituneiden aineiden pitoisuutta. Osa emissiotuotteista saattaa koskettaa materiaalien pintoja ja adsorboitua pinnalle tai se voi absorboitua esimerkiksi liukenemisen kautta pintamateriaalin sisään. Sekä adsorptio että absorptio voivat olla pysyviä, tai emittoituneet aineet voivat desorptoitua huoneilmaan, mahdollisesti myös reagoineessa uudessa kemiallisessa muodossa. Kaikkiin edellä mainittuihin ilmiöihin vaikuttavat mm. lämpötila, kosteus, ilmanvaihtokerroin, ilman nopeus ja turbulenssi (Aikivuori 2001, s. 9). Kaasumaisina MVOC:it voivat kulkeutua myös materiaalin läpi.

3.1.4 VOC-näytteenotto ja analysointi

Yleisin menetelmä kerätä sisäilmasta haihtuvia orgaanisia yhdisteitä on ottaa ilmanäyte pumpulla Tenax-adsorbentilla täytettyyn putkimaiseen ATD-keräimeen (ATD = automatic thermal desorption). Kerättävä ilmamäärä on 4–12 dm^3 ja näyte edustaa hetkellistä tilannetta. Menetelmä soveltuu kvalitatiiviseen ja kvantitatiiviseen analyysiin. Ilmanäyte voidaan ottaa myös passiivisella keräysmenetelmällä, jolloin adsorbentti jätetään paikoilleen useaksi vuorokaudeksi, esimerkiksi kahdeksi viikoksi ilman erillisiä pumppuja tai keräimiä. Suurin etu passiivisella näytteenotolla on, ettei siinä tarvita erityisiä näytteenottolaitteita. Helppo käsiteltävyys sopii erityisen hyvin kenttäolosuhteisiin. Toisaalta keruu aika saattaa määräytyä jopa useiksi viikoiksi, koska sisäilmassa pitoisuudet ovat usein matalat. Menetelmä soveltuu kvalitatiiviseen analyysiin. (Matysik ym. 2009, s. 118). Adsorbenttinäytteet analysoidaan kaasukromatografilla (GC) ja kvantitoidaan massaspektrometrillä (MS).

3.1.5 MVOC-pitoisuudet sisäilmassa

Sisäilman MVOC-pitoisuuksiin vaikuttavat MVOC-tuotto tilaan sekä ilmanvaihtuvuus tilassa. MVOC:ille homeindikaattoreina ei ole määriteltyjä raja- tai viitearvoja. Raportoituja MVOC pitoisuuksia homevaurioituneista rakennuksista, referenssirakennuksista sekä ulkoilmasta on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Raportoituja MVOC-pitoisuuksia [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]vaurioituneista rakennuksista, verrokkirakennuksista sekä ulkoilmasta (Korpi ym. 2006, s. 21).

Yhdiste	Raportoidut MVOC-pitoisuudet [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]		
	Vauriorakennukset/ -alueet	Verrokki- rakennukset/ ei valituksia	Ulkoilma
2-Metyyli-1-propanoli	n.d. - 1,74	0,38	n.d. - 0,08
3-Metyyli-1-butanoli	0,175 - 260	0,07 - 8,7	n.d. - 3,8
3-Metyyli-2-butanoli	0,19 - 1,19	0,16	n.d. - 0,43
2-Pentanol	0,012 - 1,4	0,18 - 1,7	n.d. - 0,63
3-Oktanoli	1,3 - 8,86	n.d.	n.d. - 0,14
1-Okten-3-oli	0,08 - 904	0,04 - 7	n.d. - 1,9
2-Okten-1-oli	1,56 - 266	0,30 - 13,1	n.d. - 6,82
3-Metyylifuraani	n.d. - 0,6	0,02 - 0,1	n.d. - 0,11
2-Heksanoni	0,50 - 8,8	0,46 - 2,9	n.d. - 0,8
2-Heptanoni	0,24 - 97	0,58 - 1,2	n.d. - 1,1
3-Oktanoni	0,03 - 3,02	0,14 - 3,0	n.d. - 2
2-Metyyli-isoborneoli	0,41 - 2,8	0,56	n.d. - 1,18
2-Isopropyli-3-metoksi- pyratsiini	0,6 - 9,5	n.d.	n.d. - 0,34
Geosmiini	0,006 - 0,55	n.d.	n.d. - 0,014
Dimetyylisulfidi	0,03 - 0,09	-	n.d. - 0,01

n.d.= ei määritetty

Salonen (2006) on ehdottanut väitöstutkimuksensa tulosten perusteella viitearvoksi yksittäisille orgaanisille hapoille tasoa $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja aromaattisille hiilivedyille, alkoholeille, alifaattisille hiilivedyille, aldehydeille, terpeeneille, estereille ja ketoneille tasoa $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.6 MVOC homevaurion indikaattorina

Homekasvua ei voida perustaa jonkin tietyn yhdisteen löytymiseen rakennuksesta tai rakenteesta, koska samoilla yhdisteillä on useita lähteitä ympäristössä eikä sellaisia yhdisteitä vielä ole löytynyt, jotka olisivat peräisin ainoastaan mikro-organismeista. Joissakin tutkimuksissa on lisäksi osoitettu, että yleisimpien MVOC:ien löytyminen indikoi mieluummin liiallista rakennusmateriaalin kosteutta kuin mikrobikasvustoa. Esimerkiksi rakennusmateriaalien ja pintakäsittelyaineiden aldehydyhdisteiden

emissiot kasvavat merkittävästi ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden noustessa (Wirtanen 2005, s. 140).

Kiinnostus käyttää MVOC-yhdisteitä biokontaminaatioiden indikaattoreina alkoi 1970-luvulla elintarviketeollisuudessa, kun niitä suositeltiin varastoinnissa pilaantuneiden elintarvikkeiden analysointiin nopeuden ja käytännöllisyyden vuoksi. Sisäilmasta MVOC-yhdisteitä on analysoitu 1990-luvulta lähtien. (Korpi ym. 2006, s. 2.) Sensoriteknologiaan perustuvaa MVOC-yhdisteitä tunnistavaa elektronista nenää on yritetty kehittää haistamaan hometta aikaisessa vaiheessa.

Elektroninen nenä luokittelee näytteet niiden haihtuvien yhdisteiden koostumuksen ja määrän perusteella. Se pohjautuu sensoreihin, joista jokaisella on osittainen spesifisyys tietyille haihtuville yhdisteille. Sensorit antavat näiden perusteella näytteille erilaiset "sormenjälkiprofiilit". Siten laite voidaan periaatteessa opettaa luokittelemaan tuntemattomia näytteitä erilaisiin ryhmiin. Matysik ym. (2008) ovat esittäneet homeindikaattoreiksi 1-okten-3-olia, 2-pentanonia, 2-oktanonia, 1,3-dimetoksibentseeniä, 2,4-pentadionia, pentadekaania, metyylibentsoaattia ja dimetyylisulfidia.

3.2 Sisäilman hiilidioksidipitoisuus

Sisäilman hiilidioksidipitoisuus ei ole riittävän herkkä indikoimaan näkymättömissä olevaa homekasvustoa, kun tilassa on muita hiilidioksidilähteitä ja jatkuva ilmanvaihto. Hiilidioksidituoton tason vaihtelu voi johtua kasvustojen iästä, kosteusmuutoksista ja ravinteiden saannista ja tekee hiilidioksidista huonon indikaattorin homekasvuston löytämiseksi laboratorion ulkopuolella. Ainakaan hiilidioksidin puutetta ei pidä pitää merkinä homekasvuston puuttumisesta. Laboratoriokokeessa on havaittu *Stachybotrys chartarum* -homeen tuottaneen kipsilevyllä hiilidioksidia $0,3\text{--}1,3\ \mu\text{g cm}^{-2}\text{ h}^{-1}$ (Krause 2005, s. 80).

Toisaalta rakenteen sisäiset korkeat hiilidioksidipitoisuudet ovat jonkin eliön tuottamia. Jos tuoton lähde ei ole ihminen, on hiilidioksidin tuottanut jokin muu. Mittausmenetelmä on helppo ja nopea ja saatavilla on lukuisia kaupallisia hiilidioksidimittareita eri mittausalueille. Hiilidioksidipitoisuuden nousu rakenteessa riippuu rakennusmateriaalien hiilidioksidivastuksesta.

Rakennusmateriaalien diffuusiokertoimissa hiilidioksidille on suuret erot. Esimerkiksi höyrynsulkumuovin hiilidioksidin diffuusiokerroin on noin miljoonasosa huokoisen puukuitulevyn hiilidioksidin diffuusiokertoimesta (Taulukko 6).

Taulukko 6. Hiilidioksidin diffuusiokerroin [m^2/s] ja hiilidioksidivastus [s/m] kipsilevyssä, huokoisessa puukuitulevyssä, bitumivuorauspaperissa ja höyrynsulkumuovissa 20 °C:ssa (Andersson ym. 2014, s. 374).

Rakennusmateriaali	Materiaalin paksuus [mm]	Hiilidioksidin diffuusiokerroin [m^2/s]	Hiilidioksidivastus [s/m]
Kipsilevy	13	9,20E-07	1,41E+04
Huokoinen puukuitulevy	25	2,43E-06	1,03E+04
Rakennuspaperi	0,3	1,58E-08	1,90E+04
Höyrynsulkumuovi	0,15	5,40E-12	2,78E+07

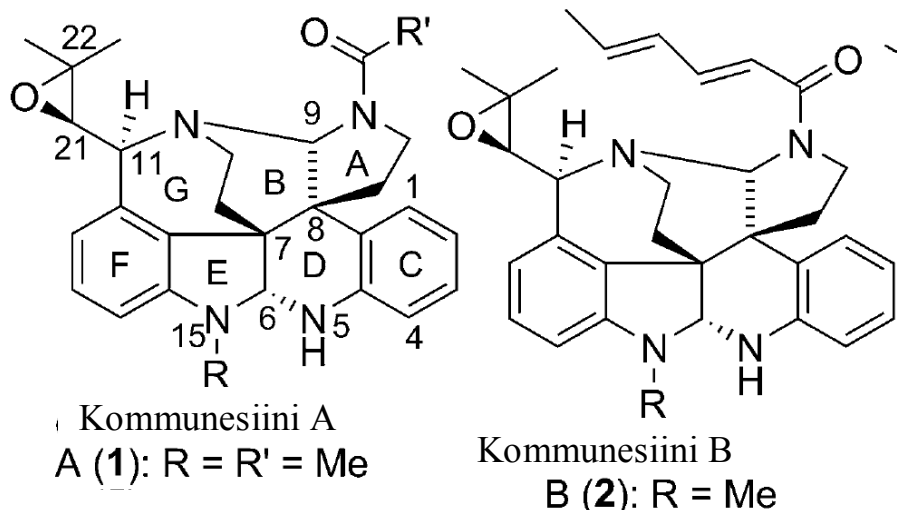
3.3 Hometoksiinit

3.3.1 Hometoksiinien tuotto rakennusmateriaaleilla

Useat homeet tuottavat aineenvaihduntatuotteinaan haihtumattomia, toksisia orgaanisia yhdisteitä, hometoksiineja. Hometoksiineja on arvioitu olevan satoja erilaisia. Hometoksiinit ovat sekundäärimetaboliitteja, usein rasvaliukoisia ja niillä on vaihtelevia kemiallisia rakenteita ja moolimassa vaihtelee 200–2000 g/mol. Esimerkkejä homesienten tuottamien toksiinien moolimassoista on taulukossa 7 ja rakennekaavoista kuvassa 10.

Taulukko 7. Joitakin homevauriotaloista eristettyjen homesienten tuottamia toksiineja.

Homelaji	Tuotetun toksiinin luokka	Tuotettu toksinen yhdiste	Moolimassa [g/mol]	Lähde
<i>Acremonium exuviarum</i>	peptaiboli	akrebolit A, B	1726, 1740	(Andersson ym. 2008, s. 917)
<i>Stachybotrys chartarum</i>	trikotekeeni	satratoksiinit H, G roridiinit E, A	529, 545 515, 533	(Gottschalk, ym. 2008, s. 105)
<i>Trichoderma harzianum</i>	peptaiboli	peptaiboli ES39	1719–1775	(Peltola ym. 2014, s. 4996)
<i>Trichoderma longibrachiatum</i>	peptaiboli	trilongiinit	1936–1965, 1175	(Mikkola ym. 2012, s. 4174)



Kuva 10. Hometoksiinien kommunesiini A ja B rakennekaavat (Zuo & Ma 2011). Kommunesiinit ovat polysyklisiä alkaloideja.

Toksiinituottoa on osoitettu tapahtuvan rakennusmateriaalialustoilla (Nielsen 2003) ja hometoksiineja on löydetty lisäksi sisäilmasta ja huonepölystä (Täubel ym. 2011, s. 372, Polizzi ym. 2009). Kaikkia hometoksiineja ei vielä tunneta. Hometoksiinituotto on riippuvainen kasvualustasta. Sekakasvustossa homeet voivat tuottaa sekundäärimetaboliitteja, joita ei tuoteta puhdasviljelmissä. (Nielsen 2002, s. 62–69).

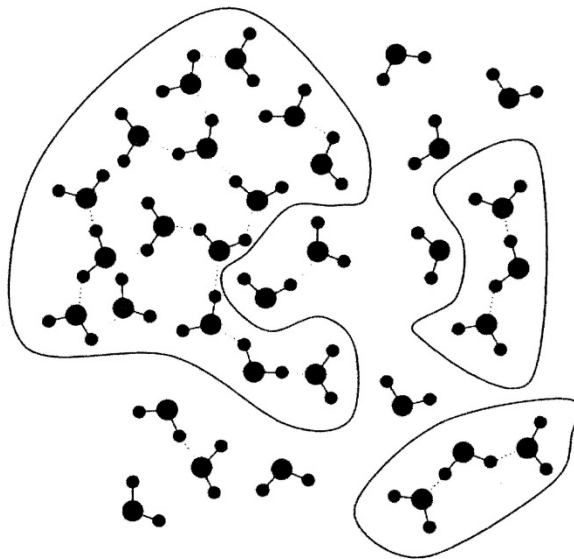
Gutarowska ym. (2010) ovat tutkineet seitsemän eri rakennuksista eristetyn toksiinituottajan toksiinituottoa mallas-agarilla, kipsilevyllä ja betonilla. Tulosten mukaan *Aspergillus flavus* tuotti mallas-agarilla yhdeksää eri toksista yhdistettä, mutta kipsilevyllä ja betonilla näistä vain neljää. Tutkimuksessa kaikki tutkitut kannat tuottivat enemmän kaikkia toksiineja mallas-agarilla kuin kipsilevyllä ja betonilla. Kaikki tutkitut kannat kasvoivat paremmin kipsilevyllä kuin betonilla. Tutkimuksessa kerätyistä kannoista 17,5 % oli toksisia. *A. flavus* tuotti rakennusmateriaalilla aflatoksiini B1 ja G1:tä. *Aspergillus versicolor* tuotti sekä sterigmatokystiiniä että viridicatinia sekä kipsilevyllä että betonilla. Parhaiten kipsilevyllä kasvoivat *S. chartarum*, *P. chrysogenum* ja *A. versicolor*. Betonilla parhaiten kasvoi *P. chrysogenum*. (Gutarowska ym. 2010, s. 671, 672.)

Polizzi ym. (2009) osoittivat kosteusvauriorakennusten huonepölystä löytyvän hometoksiineja. Seitsemästä eri rakennuksesta otetuista 99 tutkitusta näytteestä 63:sta löytyi yksi tai useampi hometoksiini LC-MS/MS -analyysillä. Näytteet olivat sisäilma, huonepöly sekä rakennusmateriaalit. Ilmanäytteenotossa käytettiin bioaerosolikeräintä, joka keräsi sisäilmasta halkaisijaltaan 1 – 10 mikrometrin kokoiset hiukkaset. Näytteistä löytyi pääasiassa roquefortiinia C, ketoglobosiinia A ja sterigmatokystiiniä. Mutta löytyi myös roridiini E:tä, okratoksiini A:tä sekä aflatoksiini B1:tä ja B2:tä. Tutkimuksessa todettiin tilasta tunnistettujen homesienten ja löydettyjen hometoksiinien sopivan yhteen. (Polizzi ym. 2009.)

3.3.2 Toksiinien kulkeutuminen sisäilmaan ja sisäilmassa

Toksiineja on tunnistettu itiöistä ja biomassasta. Rakennusmateriaalilla kasvaneesta homekasvustosta voi ilmavirtauksiin irrota kasvuston osia eli fragmentteja, itiöitä ja itiöryppäitä (Cabral 2010, s. 4289). Fragmenttien osuus kasvaa kasvuston iän mukaan (Seo ym. 2009, s. 811). Bioaerosolit sisältävät bakteerien ja homeiden soluja sekä fragmentteja ja mikrobien aineenvaihduntatuotteita. Tyypillinen bioaerosolihiukkasen halkaisija on 0,3–100 mikrometriä. Homeitiöiden sakeuteen bioaerosolissa vaikuttaa kolme tekijää: itiötuotannon määrä, kasvustoista irronneiden itiöiden määrä sekä itiöiden koko ja massa (Cabral 2010, s. 4289).

Vesimolekyylit ryhmittäytyvät ilmassa klustereiksi (Kuva 11). Klusterin koko lämpötilariippuvainen siten, että koko pienenee lämpötilan noustessa. Juuri sulamispisteen yläpuolella klusterissa on keskimäärin 250 ja 25 asteessa noin 60 vesimolekyyliä. (Decker & van Holde 2011, s. 12.) Vesimolekyylit asettuvat siten, että veden ja ilman rajapintaan muodostuu hydrofobinen pinta (Horinek ym. 2009, s. 179). Klustereihin ja hydrofobiseen pintaan perustuu vesihöyryn kyky kuljettaa itseään raskaampia molekyyleja, myös rasvaliukoisia.



Kuva 11. Vesimolekyyliklustereita ilmassa (Decker & van Holde 2011, s. 11).

3.3.3 Toksiinien näytteenotto- ja analysointitekniikat

Näytteenotto sisäilmasta

Keräysmenetelmät ovat perustuneet oletukseen, että toksiinit kulkevat sisäilmassa kiinteiden hiukkasten mukana. Keräämiseen on käytetty imurointia, polykarbonaatti-, polyuretaani- ja sähkösuodattimia (Gottschalk ym. 2008, s. 104; Polizzi ym. 2009, s. 1851). Bioaerosolien aerodynaaminen käyttäytyminen muokkautuu ominaisuuksien, kuten koon, morfologian, hygroskooppisuuden, tiheyden sekä ympäristöolosuhteiden mukaan.

Kineettisestä näkökulmasta tärkein bioaerosolin ominaisuus on sen asettumisnopeus. Hiukkasen pituuden suhde leveyteen ollessa yli kolme, bioaerosolin asento vaikuttaa asettumisnopeuteen. Ilman suhteellinen kosteus vaikuttaa hiukkasen kokoon ja tiheyteen ja siten sen aerodynaamisiin ominaisuuksiin hiukkasen hygroskooppisuudesta riippuen. Useimmat bioaerosolihiukkaset ovat sisäilmassa sähköisesti varattuja. Sähköinen varaus voi aiheuttaa nopeamman deposition jollekin pinnalle ja koagulaation vastakkain varautuneisiin hiukkasiin. Sähköistä varausta on pidetty yhtenä syynä bioaerosolien keräyshäviöihin. Suodattimia on käytetty jonkin verran. Suodattimen etu verrattuna inertiaan perustuviin keräimiin on ilman pienempi virtaus ja tällöin matalampitehoisten ja -kokoisten pumppujen tarve. (Scott ym. 2011, s. 362.)

Toksisuuden mittaamiseen riittäviä näytteitä sisäilman hiukkasia keräämällä on saatu vain elektrostaattisilla suotimilla, mutta tarvittavat ilmavirrat olivat yli 50000 m³/keräys ja keräysajat olivat 30 vuorokautta (Andersson 2010, Salkinoja-Salonen ym. 2011). Teoreettisesti sisäilman hometoksiinipitoisuuksia voidaan arvioida myös keräämällä vaakapinnoille laskeutunutta huonepölyä (Reijula, ym. 2012, s.86).

Kemialliset analyysitekniikat

Massaspektrometriaan perustuvilla analyysimenetelmillä voidaan tiettyjä toksiineja standardeina käyttäen tunnistaa näiden toksiinien esiintyminen ja tarkka määrä näytteissä. Massaspektrometriaan perustuvien menetelmien ongelmana kuitenkin on, että tutkimuksessa määritellään mitattavat yhdisteet ennalta ja muut jäävät huomiotta. Kosteusvaurioille tyypillisiä toksiineja ei tunneta riittävän hyvin, jotta voitaisi keskittyä vain tiettyihin yhdisteisiin ja niiden tunnistamiseen. (Reijula ym. 2012, s.87.)

Nestekromatografia-massaspektrometrilla (LC-MS) on analysoitu ja löydetty hometoksiineja kosteusvaurioituneiden rakennusten huonepölystä. Bloom ym. (2007) löysivät kosteusvauriorakennuksen 62 näytteestä 42:sta ainakin yhtä etsityistä toksiineista, kun massaspektrometrin etsintäasetukset oli optimoitu kolmelle toksiinille. Pölynäytteistä löydettyjen hometoksiinien pitoisuudet olivat 2,4 – 19 pg/mg ja maljalla kasvatettujen pölyviljelmien hometoksiinipitoisuudet 130 – 2500 pg/cm² kasvuston pinta-alaa kohden. (Bloom ym. 2007, s. 4212, 4213.)

Toksisuuden mittaamistekniikat

Mikrobitoksiinien haitallisuuden arviointiin voidaan käyttää tutkittavasta ympäristöstä, esimerkiksi huonepölystä, otetun näytteen solutoksikologista tappavuutta. Toksisuutta mittaamalla yhdisteitä ei voida tunnistaa. Laskeutunut vanha pöly voi sisältää toksisuutta aiheuttavia tekijöitä useista tavanomaisista lähteistä, kuten pesuaineet, ulkoilma ja polttoperäiset hiukkaset. Viranomaisen hyväksymää menetelmää huonepölyn toksisuuden mittaamiseksi ei vielä ole (toukokuussa 2014). Näin ollen esimerkiksi huonepölyn toksisuutta mittaamalla ei viranomaisluokitella kosteusvaurioituneita rakennuksia eikä toksisuuden

mittausmenetelmiä toistaiseksi käytetä rakennusten terveyshaitan viranomaisarvioinnissa tai kosteusvaurioituneiden rakennusten korjausten kiireellisyyden määrittelyssä. (THL 2013.) Kuitenkin esimerkiksi kaksoissokkotutkimuksessa, jossa tutkittiin 15 helsinkiläiskoulun 403 koululuokan ja työtilan pölynäytteiden solutoksisuus ja verrattiin solutoksisuutta oirekyselyihin, havaittiin sisätilänäytteiden toksisuuden korreloivan henkilöstön raportoitujen terveyshaittaoireiden kanssa. Toksisuusmittausten avulla tunnistettiin 15 koulun joukosta ne, joissa oli terveyshaittaoireita eniten. (Salin ym. 2012, s. 163.)

Vasteperusteisilla solutoksikologisilla menetelmillä voidaan mitata kemiallisten aineiden biologista vaikutusta, kuten myrkyllisyyttä. Ensimmäinen sisätilänäytteiden toksisuuden tutkimiseen julkaistu solutoksikologinen sovellus oli sian siittiötesti (Andersson ym. 1997). Testi soveltuu erityisen hyvin myrkkyjen läsnäolon todentamiseen, sillä siittiöt reagoivat useisiin toksiineihin. Myrkkyvaikutukset näkyvät usein solun liikkeen lamaantumisenä, joka voidaan havaita mikroskoopilla. Siittiöiden liike on ionivirtauksien ja mitokondrioiden toiminnan säätelämä. Aineet, jotka häiritsevät solun ioniliikennettä, lamaannuttavat tai kiihdyttävät siittiön liikettä. Siittiö tunnetaan herkimpänä mitokondriotoksisten aineiden läsnäolon biosensorina (Hoornstra ym. 2004). Siittiösolu ei reagoi aineisiin, joiden ensisijainen vaikutus kohdistuu solun makromolekyyli synteesiin.

Solujen altistus vaatii kantaja-aineen, johon toksinen aine on liuenut. Kantaja-aineena käytetään usein metanolia tai etanolia, koska useimmat rasva- ja vesiliukoiset toksiinit liukenevat näihin liuottimiin, eivätkä liuottimet häiritse juurikaan testituloksia. Altisteliuksesta valmistetaan laimennossarja, jota annostellaan kuhunkin solunäytteeseen. Pitoisuus, joka lamaannuttaa puolet soluista, on arvotetaan EC₅₀.

Mitokondriovaurio todetaan kalvopotentiaalia mittaavalla fluorogeenisellä reagenssilla, JC-1:llä, tai suoraan sähköisesti pikoamperometrillä ja BLM tekniikalla (black lipid membrane). Kohdesoluina on käytetty esimerkiksi siittiöitä, epiteelisoluja (PK-15) tai hermosoluja (MNA).

Solun makromolekyyli synteesien estäjien mittaamiseen käytetään kohdesoluina jatkuvasti jakautuvia solulinjoja, kuten sian munuaissolut (PK-15), kissan sikiön keuhkosolut (FL) sekä myös syöpäsolulinjoja kuten hiiren hermosolut (MNA).

3.3.4 Sisäilman hometoksiinipitoisuudet ja toksisuus

Mitatut tai laskeutuneen pölyn perusteella arvioitujen hometoksiinipitoisuudet sisäilmassa ovat olleet pieniä. Joitakin mitattuja pitoisuuksia on koottu taulukkoon 8. Taulukossa 9 on yhteenveto Salkinoja-Salosen ym. (2011) tutkimuksen aerosolihiukkaskasvustojen ominaistoksisuuksista sian siittiöillä mitattuna.

Taulukko 8. Joitakin kosteusvaurioituneista rakennuksista mitattuja tai arvioituja hometoksiinien pitoisuuksia laskeutuneessa pölyssä ja sisäilmassa.

Hometoksiini	Pitoisuus [pg/mg pölyä]	Arvioitu* tai mitattu	Lähde
		hometoksiini- pitoisuus ilmassa [ng/m ³]	
Enniatiini B	0,35-1,1	0,000024*	(Täubel ym. 2011, s. 372)
Beauverisiini	0,67-1,6	0,000045*	(Täubel ym. 2011, s. 372)
Verrukaroli	0,6-18	0,000042-0,00012*	(Bloom ym. 2009, s. 156)
Sterigmatokystiini	16-28	0,002*	(Bloom ym. 2009, s. 156)
Sterigmatokystiini		0,003-1,8	(Polizzi ym. 2009, s. 1853)
Ketoglobosiini		0,0067-3,4	(Polizzi ym. 2009, s. 1853)
Okratoksiini A		0,012-0,23	(Polizzi ym. 2009, s. 1853)
Satratoksiini G		0,25	(Gottschalk ym. 2008, s. 106)
Satratoksiini H		0,43	(Gottschalk ym. 2008, s. 106)
Makrosyklisiä trikotekeenejä		1,5-2,7	(Brasel ym. 2005, s. 7379)

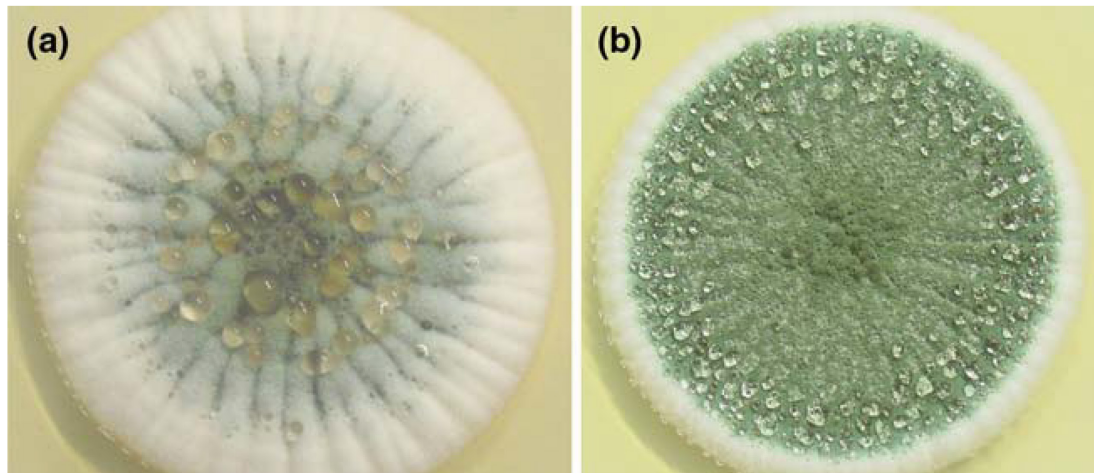
Taulukko 9. 156 näytteen aerosolihiukkaskasvustojen ominaistoksisuus sian siittiöillä mitattuna (Salkinoja-Salonen ym. 2011, s. 105). Näytteet on kerätty kohteista, joissa oli sisäilmasta aiheutuneita haittaoirevalituksia (valituskohteet) ja kohteita, joissa valituksia sisäilmaan liittyen ei ollut (verrokkikohteet).

Altistusaika: 30 min	EC ₅₀ [µg/ml]			n =
	< 30	60-125	≥ 250	
Valituskohteiden näytteet	30 kpl 65 %	6 kpl 13 %	10 kpl 22 %	46
Verrokkikohteiden näytteet	0 kpl < 3 %	7 kpl 22 %	25 kpl 78 %	32
Altistusaika 3-4 d	EC ₅₀ [µg/ml]			n =
	0,04-5	20-40	50-100	
Valituskohteiden näytteet	68 kpl 76 %	9 kpl 5 %	13 kpl 12 %	90
Verrokkikohteiden näytteet	2 kpl 5 %	9 kpl 23 %	27 kpl 62 %	39

3.3.5 Hometoksiineja nestepisaroissa

Joidenkin homelajien on todettu tuottavan nestemäisiä sekundäärimetaboliitteja (Dijksterhuis 2011, s. 91). Näitä nestepisaroita on tutkittu vasta vähän, eikä nestepisaroiden tehtävää tai ekologista roolia vielä tiedetä. On ehdotettu vesisäiliönä toimimista (Jennings 1991, s. 883), ja aineenvaihduntatuotteiden varastointia (Hutwimmer ym. 2010, s. 1). Muutamien *Aspergillus*- ja *Penicillium*-lajien on todettu tuottavan hometoksiineja sisältäviä nestepisaroita (Grovel ym. 2003, s. 297),

(Gareis & Gareis 2007, s. 209). Kuvassa 12 on esimerkki kahden *Penicillium*-kannan tuottamista nestepisaroista.



Kuva 12. a) *Penicillium nordicum* SP: 1840 ja b) *Penicillium verrucosum* SP: 1002 -kantojen kasvustojen tuottamia nestepisaroita (Gareis & Gareis 2007, s. 209).

Gareis ja Gareis (2007) osoittivat ensimmäisinä, että toksisten *Penicillium*-kantojen erittämät nestepisarot sisälsivät suuren pitoisuuden okratoksiini A:ta ja okratoksiini B:tä, 92,7–8667,0 ng/ml ja 159,7–2943,3 ng/ml. Nestepisaroiden okratoksiinipitoisuudet olivat korkeammat kuin rihmakasvustoista mitatut pitoisuudet (Gareis & Gareis 2007, s. 209-213).

Gareis & Gottschalk (2014) julkaisivat ensimmäisinä myös rakennusmateriaaleista eristettyjen homekantojen tuottavan toksiineja sisältäviä nestepisaroita (Kuva 13). Tutkimuksessa käytettiin kantakokoelmasta hankittuja rakennusmateriaaleista eristettyjä *Stachybotrys*-homeen kantoja. Homekantojen tuottamien nestepisaroiden satratoksiini G ja H -pitoisuudet LC-MS/MS -analyysissä olivat 280–4610 ng/ml (Gareis & Gottshalk 2014).



Kuva 13. Rakennusmateriaaleista eristetyn *Stachybotrys*-homekantojen tuottamia nestepisaroita (Gottschalk & Gareis 2014).

4 Kokeellinen tutkimus

4.1 Kokeellisen työn tavoitteet

Kokeellisen työn tavoite oli kehittää kvantitatiivisia menetelmiä paikallistamaan suurista homevaurioituneista rakennuskokonaisuuksista haitallisimmat tilat tai haitan lähde. Tavoitteen saavuttamiseksi tutkittiin sisäilmaongelmaista rakennusta monitieteisesti, hyödyntäen rakennusfysiikan, mikrobiologian, solutoksikologian ja kemian analytiikan menetelmiä.

4.2 Kokeellisen työn menetelmät

4.2.1 Kenttäkokeiden kohdekuvaukset

Kenttäkokekohteina olivat kolmekerroksinen kellarillinen toimistorakennus Espoossa sekä koulurakennus Sipoossa. Toimistorakennus oli kaksiosainen, joista vanha osa oli rakennettu 1959 ja uusi osa 1960-luvun puolivälissä. Rakennus oli betonirunkoinen, tiilivuorattu ja eristeenä oli mineraalivillaa. Sokkelirakenteessa oli käytetty korkkilevyä. Rakennuksessa oli tehty vuonna 2010 laajamittainen sisäilmaselvitys ja tiivistyskorjauksia. Samalla oli todettu, että vanhan ja uuden osan välisessä liikuntasaumassa betonivalun sisään oli jätetty kovalevy koko liikuntasaumassa pohjakerroksesta ylimpään kerrokseen. Kovalevyä epäiltiin yhdeksi sisäilmaongelmien syyksi.

Tutkimuksen kohteena oli seitsemän toimistohuonetta. Näistä neljässä työntekijällä oli sisäilmaan liittyviä hättöoirevalituksia, ja kolme huoneista oli tästä syystä poistettu käytöstä. Kussakin huoneessa oli työskennellyt yksi henkilö. Kolmesta huoneesta ei ollut hättöoirevalituksia. Huoneiden esittely:

- 335 sijaitsi kolmannessa kerroksessa, lattiapinta-ala 30 m² ja tilavuus 84 m³. Huone oli tutkimusten aikana pois käytöstä. Aiemmin huoneessa työskennellyt henkilö oli oireillut huonetilassa. Huone yhdistyi vanhan ja uuden osan liikuntasamaan.
- 131a sijaitsi ensimmäisessä kerroksessa, lattiapinta-ala 18 m² ja tilavuus 58 m³. Huone oli tutkimusten aikaan pois käytöstä. Aiemmin huoneessa työskennellyt henkilö oli oireillut huonetilassa. 11.12.2009 oli tutkittu pölynäytteiden toksisuutta solutoksikologisilla kokeilla, ja tulokseksi saatu EC₅₀ kolmen vuorokauden altistuksella 12,5 - 6,25 µg/ml (Raportti myrkyllisyysmittauksesta, 2010a). Pölyn toksisuus luokiteltiin selvästi solumyrkylliseksi. Tämän jälkeen huoneessa oli tehty tiivistyskorjauksia.

Huoneessa oli helmikuussa 2013 tehty STM:n ohjeen mukaiset ilman sieni-itiöpitoisuusmittaukset 6-vaihe-keräimellä. Tulosten mukaan sieni-itiöpitoisuus sisäilmassa oli ollut 6.2.2013 7 cfu/m³ ja lajina *Paecilomyces* sp. sekä 8.2.2013 sieni-itiöpitoisuus sisäilmassa 0 cfu/m³ eli sisäilman sieni-itiöpitoisuudet olivat

olleet alhaisia (Sisäilmasto- ja kosteustekninen kuntotutkimus, 2013). Samalla oli todettu huoneen alipaineisuus ulkoilmaan nähden olleen tutkimushetkellä 3 Pa.

- 131b sijaitsi ensimmäisessä kerroksessa, lattiapinta-ala 11,7 m² ja tilavuus 35 m³. Huone oli pois käytöstä. Aiemmin huoneessa työskennellyt henkilö oli oireillut huonetilassa. 11.12.2009 oli tutkittu pölynäytteiden toksisuutta solutoksikologisilla kokeilla ja tulokseksi saatu EC₅₀ (3 vrk altistus) 3,13 – 1,56 µg/ml (Raportti myrkyllisyysmittauksesta, 2010b). Pölyn toksisuus luokiteltiin selvästi solumyrkylliseksi. Tämän jälkeen huoneessa oli tehty tiivistyskorjauksia.

Huoneessa oli tehty helmikuussa 2013 STM:n ohjeen mukaiset ilman sienitiöpitaisuusmittaukset 6-vaihekeräimellä. Mittaustulosten mukaan sienitiöpitaisuus sisäilmassa oli ollut 6.2.2013 0 cfu/m³ ja 8.2.2013 sienitiöpitaisuus sisäilmassa 4 cfu/m³ (steriilit) eli sisäilman mikrobipitoisuudet olivat olleet alhaisia (Sisäilmasto- ja kosteustekninen kuntotutkimus, 2013). Huone oli ollut mittaushetkellä ulkoilmaan nähden 4 Pa alipaineinen.

- 145b sijaitsi ensimmäisessä kerroksessa, lattiapinta-ala 18 m² ja tilavuus 45 m³. Huone oli vähäisessä käytössä. Huoneessa työskennellyt henkilö oireili oleiltuaan huoneessa yli puoli tuntia päivän aikana. Huone yhdistyi rakennuksen vanhan ja uuden osan liikuntasamaan.
- 146 sijaitsi ensimmäisessä kerroksessa, lattiapinta-ala 26 m² ja tilavuus 74 m³. Huoneessa työskenteli yksi henkilö. Työntekijällä ei ollut sisäilmaan liittyviä häiritseviä oireita. Huone yhdistyi rakennuksen vanhan ja uuden osan liikuntasamaan.
- 223 sijaitsi toisessa kerroksessa, lattia-pinta-ala 28 m² ja tilavuus 75 m³. Huoneessa työskenteli 4 henkilöä. Näillä ei ollut sisäilmaan liittyviä häiritseviä oireita. Huone ei sijainnut vaurioaiheuttajaksi epäillyn liikuntasaman läheisyydessä.
- 134 sijaitsi ensimmäisessä kerroksessa, lattia-pinta-ala 28 m² ja tilavuus 75 m³. Huoneessa työskenteli 1 henkilö. Hänellä ei ollut sisäilmaan liittyviä häiritseviä oireita. Huone ei sijainnut vaurioaiheuttajaksi epäillyn liikuntasaman läheisyydessä.

Koulurakennus oli neljän eri aikana rakennetun osan kokonaisuus.

- Luokkahuone B1 sijaitsi vuonna 1920 rakennetussa osassa, joka oli puurunkoinen ja rapattu. Ilmanvaihto oli painovoimainen ja ulkoseinälle oli asennettu korvausilmaventtiili. Henkilökunnalla oli huoneessa ollut sisäilmaan liittyvää oireilua. Kohonneita mikrobipitoisuuksia ei näytteidenotossa ollut havaittu. Ikkunarakenteissa oli kosteusrasitusjälkiä ja maalipinta lohkeili korvausilmaventtiilin ympäriltä. Luokkahuoneen mitat olivat 6,5*10,20*3,20 => lattiapinta-ala 66 m², tilavuus 210 m³. Mittausajanjaksolla huoneessa oli kaksi Airstatic FA5 – ilmanpuhdistinta jatkuvatoimisesti käytössä. Luokkahuone oli opetuskäytössä tutkimuksen ajan

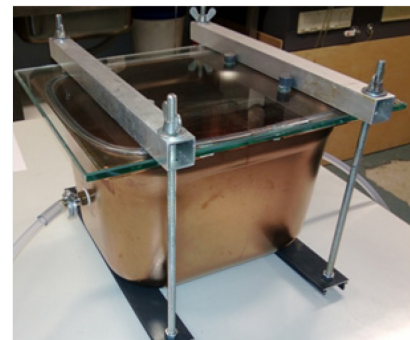
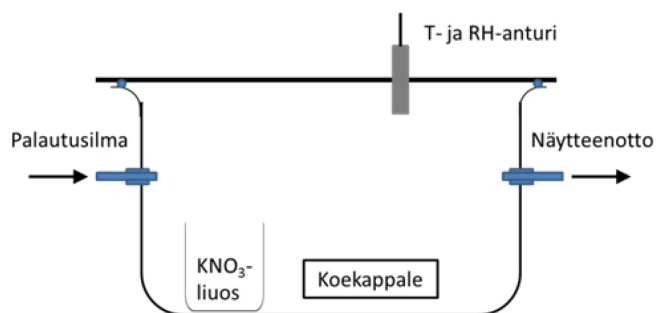
- Luokkahuone B3 sijaitsi vuonna 1969 rakennetussa osassa, joka oli tiilivuorattu, betonirunkoinen ja kaksikerroksinen. Alapohjarakenteena oli maanvarainen betonilaatta. Ilmanvaihtona oli koneellinen tulo ja poisto. Rakennuksen ikkunoiden puitteet olivat kosteusvaurioituneet. Luokkahuoneen ulkoseinässä ikkunan alla oli tiilivuorauksessa kosteusvaurioon viittaavia jälkiä. Henkilökunnalla oli huoneessa sisäilmaan liittyvää oireilua. Huoneen mitat olivat 9,20*7,0*2,90 => lattiapinta-ala 64 m², tilavuus 187 m³. Mittausajanjaksolla huoneessa oli kaksi Airstatic FA5 -ilmanpuhdistinta jatkuvatoimisesti käytössä. Luokkahuone oli opetuskäytössä tutkimuksen ajan.

4.2.2 Koekammioiden kuvaukset

Teräskammiot

Koekammiot olivat teräsastioita, tilavuus 12,5 litraa, kantana 8 mm paksu karkaistua lasi, johon oli porattu kosteus-, lämpötila- ja VOC-antureille neljä reikää, halkaisija 12 mm. Anturit tiivistettiin malkitillä reikiin. Tiivisteenä lasin ja teräsastian välissä oli PE-letku. Lasikansi puristettiin tiiviisti kammion päälle ruuvattavien pantojen avulla. Teräsastiassa oli läpiviennit ilmanäytekohteita vasten. PE-letku kiersi toisesta läpiviennistä toiseen. Läpivienneissä oli teflon-tiivisteet muttereiden ja teräsastian seinämän välissä.

Kammion osat, jotka ovat kosketuksissa kammion sisäpuolelle, puhdistettiin ensin vedellä, sitten ionisoidulla vedellä, sitten etanolilla ja vielä kuumennettiin lämpökaapissa. Teräsosat kuumennettiin +400 °C kaksi tuntia, muut osat +80 °C kaksi tuntia. Läpiviennit tiivistettiin ulkopuolelta malkitillä ja ilmastointiteipillä. Koekammio on kuvassa 14.

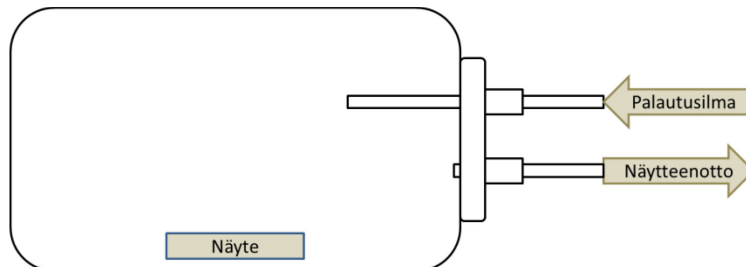


Kuva 14. Teräksinen koekammio, vasemmalla kaaviokuva ja oikealla valokuva koekammiosta.

Lasikammiot

Lasikammioiden tilavuus oli 3,7 litraa. Lasikammion toisella sivulla oli kaksi läpivientiä näytteenottoa ja ilmapirtauksia varten (Kuva 15). Läpiviennit olivat teräksisiä ja letkut LD-PE -muovia. Ennen kokeiden aloitusta lasikammion kaikki

osat pestiin ionisoidulla vedellä ja huuhdeltiin kolmesti etanolilla (Etax A). Kammion läpiviennit tiivistettiin ilmastointiteipillä, ja tiivistyksen varmistamiseksi tehtiin painekoe. Kammio oli suljettuna muulloin kuin näytteenoton aikana. Näytteenotto- ja palautusilmaletkut yhdistettiin teflonputkella ja tiivistettiin parafiinikelmulla (Parafilm®) ja ilmastointiteipillä.



Kuva 15. Laboratoriokokeessa käytetty lasikammio.

4.2.3 Näytteenotto- ja viljelymenetelmät pölystä, rakennusmateriaalista sekä sisäilmasta

Maljaviljelyn alustana oli mallas-agaria (malt extract agar, MEA) (mallasuute 15 g + agar 10 g + vesi 600 ml), (Mallasuute: Scharlau, Espanja; Agar Bacteriological: LAB M Ltd, Iso-Britannia). Viljelyn jälkeen maljat teipattiin umpeen kaksi- tai kolminkertaisella tarrateippikierroksella maljojen kuivumisen ja kontaminoitumisen estämiseksi. Maljoja säilytettiin vetokaapeissa huonelämpötilassa neljän viikon ajan. Neljän viikon kasvatusaika valittiin, koska käytännön kokemus (Helsingin yliopisto, Mirja Salkinoja-Salosen tutkimusryhmä) on osoittanut, ettei 7 vuorokauden kasvatusaika ole riittävän pitkä kaikkien homeiden kasvulle.

Pölynäyte otettiin tutkittavan huoneen yläpinnoilta pyyhkimällä pintaa steriloidulla pumpulipääpuikolla, muovisilmukalla tai mikroskooppilasilla. Saatu näyte siveltiin mallas-agar-kasvatusmaljan pintaan (Kuva 16). Kustakin pölynäytteestä tehtiin kaksi laimennosta.

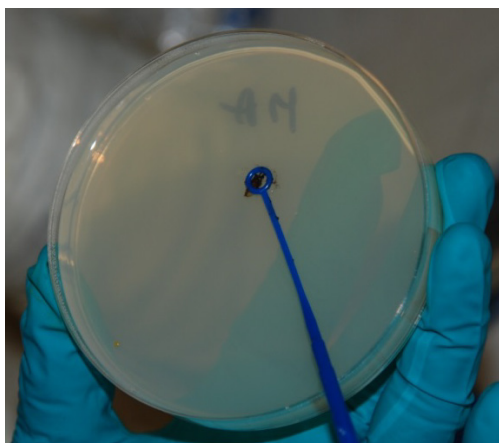
Laskeuman keruumalja (MEA) jätettiin tutkittavaan huoneeseen tunniksi ilman kantta keskelle huonetta noin 1 metri lattiatason yläpuolella.

Materiaalinäytteestä tehtiin kontaktimalja (MEA) pyörittämällä maljan pinnalla noin 2 mm * 2 mm * 2 mm kokoista korkkilevypalaa.

Sisäilmasta otettiin yksivaihekeräimellä (SAS) 20 sekunnin näyte, 60 litraa, suoraan kasvatusmaljalle (MEA).

Homeiden lajimääritys

Osasta pesäkkeitä tehtiin puhtasviljelmät, joille tehtiin alustava lajimääritys mikroskopioimalla (Maria A. Andersson, Helsingin yliopisto). Määritys tarkennettiin ITS-sekvenssin avulla (László Kredics, Szegedin yliopisto, Unkari).



Kuva 16. Mallas-agar-malja, jolle siirrostetaan silmukalla tutkittavasta huoneesta kerättyä laskeutunutta pölyä kasvatusta varten.

Pesäkkeiden numerointi ja pesäkeuutteet

Maljoille kasvaneet erillispesäkkeet numeroitiin (Kuva 17) ja niistä tehtiin pesäkeuutokset ottamalla kustakin pesäkkeestä steriilillä neulalla noin 20 mg massaa lasiampulliin, johon lisättiin 200 µl etanolia. Lasiampulli numeroitiin pesäkenumeron mukaan, suljettiin tiivisteellä varustetulla kierrekorkilla ja kuumennettiin vesihauteessa 10 minuuttia + 80 °C.



Kuva 17. Mallas-agar-maljalla kasvaneita mikrobipesäkkeitä numeroituna toksisuusmittausta varten.

Puhdasviljelmä

Erillispesäkkeistä tehtiin puhdasviljelmät MEA-maljalle, joka suljettiin tarrateipillä. Kasvatusaika oli 3–5 viikkoa vetokaapissa huonelämpötilassa.

Biomassauutteen valmistus

Kasvatusmaljalle kaadettiin biomassan päälle etanolia siten, että kasvusto peittyi. Biomassa kaavittiin objektilasilla maljalta dekanterilasiin. Biomassa-etanoli-seos lämmitettiin 2 h, 65 °C. Seos sentrifugoitiin linkoputkissa (Rotonix 32, 2000 rpm, 12 min). Supernatantti dekanttoitiin punnittuihin dekanterilaseihin ja haihdutettiin (+ 62 °C). Haihdutusjäännös punnittiin ja liuotettiin dekanterilasista metanolilla/etanolilla (2 ml) lasiampulliin ja varastoititiin - 20 °C:ssa. Dekanterilasiin jäänyt liukenematon sakka punnittiin, jotta voitiin laskea uutteen pitoisuus [mg/ml]. Biomassauutteen valmistuksen vaiheita on kuvassa 18. Menetelmä on kuvattu julkaisussa (Andersson ym. 2009).



Kuva 18. Biomassauutteen valmistus. A) etanolilla peitetyltä maljalta kaavitaan biomassa maljalta objektilasilla ja b) kaadetaan linkoputkeen; c) linkoputket sentrifugoidaan, d) erottunut uute kaadetaan dekanterilasiin haihdutettavaksi, e) haihdutusjäännös liuotetaan dekanterilasista etanoliin ja f) saatu biomassauute varastoidaan lasiampulleihin.

4.2.4 Kondenssivesien käsittely toksisuusmittauksia varten

Kylmälevyn keräysastiaan kertynyt vesi kaadettiin puhtaaseen lasipulloon, johon lisättiin etanolia (Etax A) noin 20 % vesinäytteen määrästä estämään mahdollinen mikrobikasvu. Veteen liukenemattoman aineksen keräämiseksi keräysastia huuhdeltiin etanolilla, ja etanolihuuhte varastoitiin puhtaaseen lasipulloon. Kuiva-ainespitoisuuksien selvittämiseksi nesteet haihdutettiin 62 °C:ssa lämpölevyllä vetokaapissa. Haihdutusjäännökset punnittiin ja uutettiin metanoliin. Näin saatujen liuosten toksisuus sian siittiöille sekä MNA- ja PK-15-soluille testattiin luvun 4.2.5 menetelmin ja määritettiin näytteen EC₅₀ [µg/ml].

4.2.5 Toksisuustestit

Toksisuustestit ovat Helsingin yliopiston Mirja Salkinoja-Salosen tutkimusryhmän menetelmiä. Toksisuustestejä tehtiin sekä sian siittiösoluilla että somaattisilla soluilla. Siittiöillä elävyyden indikaattorina eli elävyydvasteena oli liikkuminen ja somaattisilla soluilla solun jakautuminen, joka mitattiin solujen lukumäärän kasvuna. Eri homeilla on erilaisia toksisia vaikutuksia. Yhdistämällä näitä kahta testiä mitattiin mikrobien tuottamat makromolekyyli-synteesin sekä ioniliikenteen ja energiatuotannon häiritsijät.

Pesäke katsottiin seulontatestissä siittiötoksiseksi, jos < 20 µl 2 ml:ssa siittiösuspensiota aiheutti yli 50 % laskun liikkuvien siittiöiden (Figen, Ltd., Tuomikylä, Suomi) määrässä verrattuna etanoliverrokkiin tunnin altistuksessa.

Ominaistoksisuuden määrittäminen (EC₅₀) tehtiin siittiöillä Anderssonin ym. (2010) mukaisesti. Tutkittavan näytteen haihdutusjäännös punnittiin ja liuotettiin etanoliin (Etax A) siten, että liuoksen pitoisuudeksi saatiin 10 mg/ml. 30 ja 60 minuutin altistuskokeissa käytettiin testipitoisuuksia 250 µg/ml, 100 µg/ml, 50 µg/ml ja 25 µg/ml. Vuorokauden altistuskokeessa testipitoisuudet olivat 100 µg/ml, 50 µg/ml, 25 µg/ml, 10 µg/ml ja 5 µg/ml. Verrokkinäyte oli etanolia. Kunkin näyteputken lisättiin 200 µl sian siittiöitä (Figen, Ltd., Tuomikylä, Suomi). Altistusajan jälkeen näyteputkiloja lämmitettiin 37 °C, 3 min.

Näyteputket sekoitettiin ravistamalla. Hematokriittikapillaarilla otettu näyte asetettiin 37 °C lämmitetyille mikroskooppilasille ja mikroskopoitui. Siittiöiden liike kirjattiin liikkuvien prosentuaalisena osuutena. Toksisuus ilmaistiin EC₅₀:llä (kaava 2). EC₅₀ kuvaa tutkitun näytteen pitoisuutta jolle altistettuna puolet siittiöistä menetti liikuntakykynsä.

$$EC_{50} = \frac{DM \cdot V_1}{V_2} \quad (2)$$

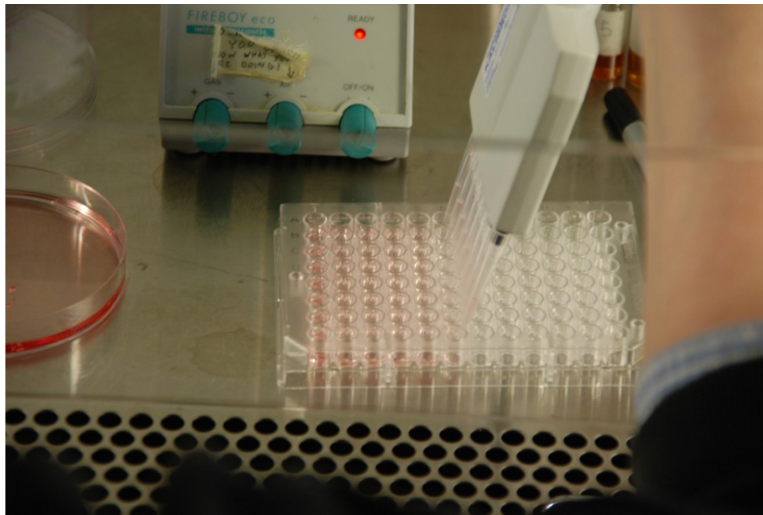
jossa DM on uutteen kuiva-ainepitoisuus [µg/ml]
 V₁ on lisätyn uutteen tilavuus [µl]
 V₂ on siittiösuspension tilavuus [ml].

Siittiötestissä toksisuuden raja-arvo tunnin altistuksen jälkeen oli < 60 µg ml⁻¹ ja yhden päivän altistuksen jälkeen 10 µg ml⁻¹.

Sytotoksisuustesti somaattisilla soluilla, toksisuusvaikutus solun jakautumisen loppuminen

Solut sytotoksisuustestejä varten kasvatettiin seuraavasti: kolme eri solulinjaa PK-15 (sian munuaisepiteelisolulinja), FFL (kissan sikiön keuhkosolulinja) ja MNA (hiiren hermosolulinja) kasvatettiin RPMI 1640 elatusaineessa, johon oli lisätty glutamiinia (Gibco, Invitrogen), 10 % FBS-liuosta (Fetal bovine serum, Gibco, Invitrogen) ja penisilliini/streptomysiiniliuosta (Pen Strep Gibco, Invitrogen, penicillin 10000 units ml⁻¹ streptomycin 10000 µg ml⁻¹). Pen Strep -liuosta lisättiin 5 ml / 500 ml RPMI. Kasvatus ja altistus tehtiin soluviljelykaapissa (Heracell 150 i, Thermo Scientific Waltham MA USA), 37 °C, CO₂=5%, O₂=19.5%, RH > 95 %.

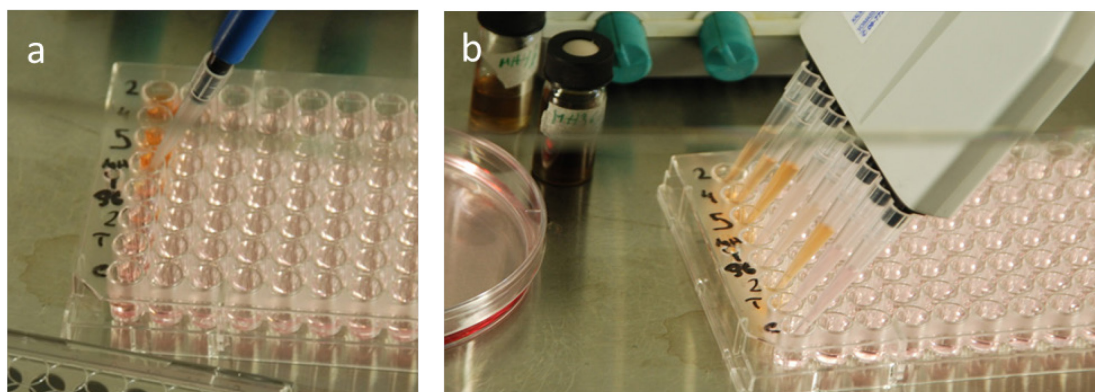
Kuoppalevyllä (Nunc, Roskilde Tanska) pipetoitiin kuhunkin kaivoon 100 µl elatusainetta (Gibco, RPMI Medium 1640) (Kuva 19), paitsi ensimmäiselle pystysarakkeelle 180 µl.



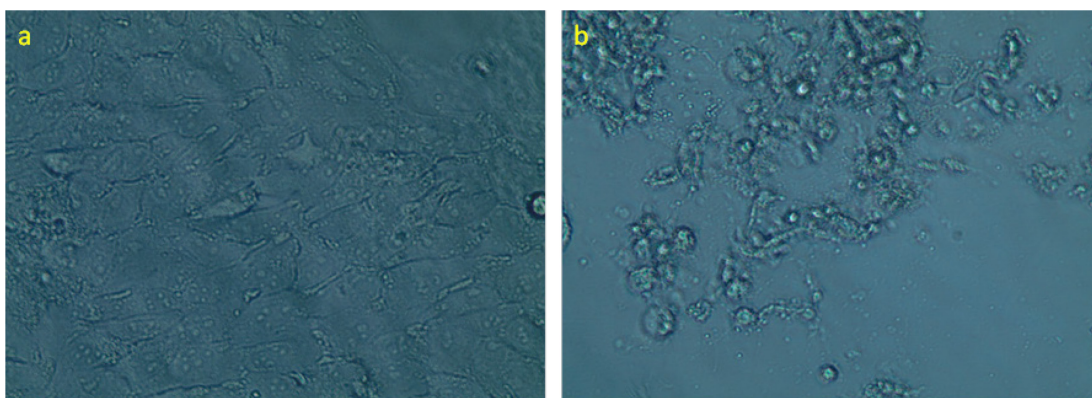
Kuva 19. Kuoppalevyn kuoppiin pipetoidaan 100 µl elatusainetta PK-15 -solujen altistusta varten.

Kuoppalevyn ensimmäiselle pystysarakkeelle lisättiin kuhunkin kaivoon altisteliuosta 20 µl. Altisteen pitoisuus laimennettiin sarakkeittain aina puoleen edellisestä (Kuva 20). Kaivoihin lisättiin 100 µl trypsinoituja soluja. Altistusajan levyä inkuboitiin soluviljelykaapissa +37 °C, 5 % CO₂, 19,5 % O₂, RH > 95 %. Altistusajan kuluttua soluja tarkasteltiin mikroskoopilla (Kuva 21) ja merkittiin eri laimennoksiin, olivatko solut eläviä vai kuolleita.

Kuoppalevyn kuoppiin lisättiin resatsuriinia (Sigma, Rezatsurin sodium salt) 40 mg / 100 ml liuotettuna 0,9 % steriiliin NaCl:iin, 10 µl kuhunkin kuoppaan. Solut inkuboitiin resatsuriinilisäyksen jälkeen soluviljelykaapissa kaksi tuntia. Sytotoksisuus määritettiin resatsuriinin pelkistymisen estymisenä.



Kuva 20. PK-15 -solujen altistus mikrobiuutteille. A) kuoppalevyllä kuopissa elatusainetta 100 μ l, ensimmäiselle sarakkeelle lisätään mikrobialtistetta b) laimennossarjan tekeminen.



Kuva 21. PK-15 -soluja mikroskooppikuvassa. A) Ehjä solumatto, verrokki b) mikrobiuutteelle altistettut solut ovat kuolleet.

Elävät altistamattomat solut pelkistävät sinistä resatsuriinia semipelkistettyyn muotoon, resorufiiniksi, joka on väriltään punainen ja fluorogeeninen. Resorufiinin fluoresenssi (ex 544 nm/ em 590nm) on verrannollinen solujen tuottamien pelkistysekvivalenttien määrään (NADPH ja NADH), joka kuvaa elävien solujen osuutta näytteessä. Tämä tulos varmistettiin tarkistamalla solujen kasvu vaihesiirtomikroskoopissa. Menetelmä on kuvattu julkaisussa (Ali-Vehmas ym. 1991).

Kasvun lakkaaminen laskettiin resatsuriinin pelkistyksen estymisenä kaavalla 3.

$$I = 100 \% - \left(\frac{F_i - F_0}{F_{max} - F_0} \right) * 100 \% \quad (3)$$

jossa

I on estyminen joka ilmaistaan % -osuutena ei-altistettujen solujen eli vain kantoaineelle altistettujen solujen fluoresenssista

F_i on näytteen eli altistettujen solujen fluoresenssi 3 d jälkeen

F_0 on pelkän elatusaineen + altisteen (ilman soluja) fluoresenssi 3 d jälkeen
 F_{\max} on etanolikontrollin fluoresenssi (solut + etanoli, ilman altistetta).

Sytotoksisuustestissä somaattisilla soluilla toksisuuden raja-arvona pidettiin EC_{50} lukua, joka oli $< 60 \mu\text{g ml}^{-1}$. Tämä testi sietää enimmillään kuiva-ainepitoisuuksia $600 \mu\text{g ml}^{-1}$ asti.

4.2.6 Sisäilman vesihöyryn kondenssikeräyslaite

Sisäilman vesihöyryn kondenssikeräysmenetelmä kehitettiin tämän diplomityön aikana Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksella.

Ilman sisältämän vesihöyryn maksimipitoisuus riippuu lämpötilasta kaavan 4 mukaisesti.

$$v_{kr} = 4,85 + 3,47 * \left(\frac{T}{10}\right) + 0,945 * \left(\frac{T}{10}\right)^2 + 0,158 * \left(\frac{T}{10}\right)^3 + 0,0281 * \left(\frac{T}{10}\right)^4 \quad (4)$$

jossa v_{kr} on kriittinen vesihöyrypitoisuus [g/m^3]
 T on lämpötila [$^{\circ}\text{C}$].

Ilman sisältämää vettä kondensoituu pintoihin, joiden lämpötilan mukainen kriittinen vesihöyrypitoisuus v_{kr} on matalampi kuin ilman sisältämä vesihöyrypitoisuus.

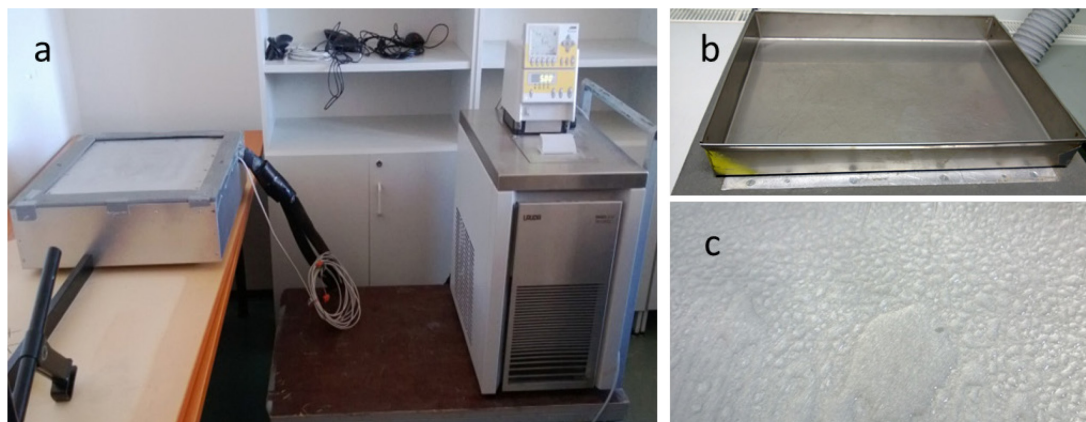
Sisäilman sisältämää vesihöyryä kerättiin kondensoimalla vesihöyry kylmälevyn päälle asetettuun teräksiseen keräysastiaan (43 cm * 32 cm). Keräysastian tuli olla helposti puhdistettavissa eikä materiaalista itsestään saanut irrota epäpuhtauksia näytteeseen. Kylmälevyn lämpötila säädettiin viilennystermostaatilla (LAUDA eco RE 1050) lämpötilaan -2°C . Tällöin keräysastian pintalämpötila oli 3°C ja pinnan kriittinen vesihöyrypitoisuus 6 g/m^3 . Kondenssikeräyslaitteisto on kuvassa 22. Kylmäaineena käytettiin glykolia.

Kondenssikeräysjakson ajalta mitattiin kaikista tutkittavista tiloista myös ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila (Vaisala HMP ja Grant-datalogger, tallennus 15 minuutin välein) sekä toimistohuoneesta 145b ja luokahuoneesta B3 sisäilman hiilidioksidipitoisuus (Tinytag-hiilidioksidimittari ja -datalogger, tallennus 15 minuutin välein). Suhteellisen kosteuden ϕ [%] ja lämpötilan T [$^{\circ}\text{C}$] avulla laskettiin sisäilman vesihöyrypitoisuus v_s [g/m^3] kaavan 4 ja 5 avulla.

$$v_s = \phi * v_{kr} \quad (5)$$

jossa v_s on sisäilman vesihöyrypitoisuus [g/m^3]
 ϕ on suhteellinen kosteus [%]
 v_{kr} on lämpötilasta riippuva kriittinen vesihöyrypitoisuus (kaava 4) [g/m^3]

Mittausjakson keskimääräisen vesihöyrypitoisuuden ja kondenssikeräimen pintalämpötilan mukaisen kylläisen vesihöyrypitoisuuden erotuksen avulla voitiin laskea, kuinka suurta ilmatilavuutta [m³] vastaava vesihöyry saatiin talteen.



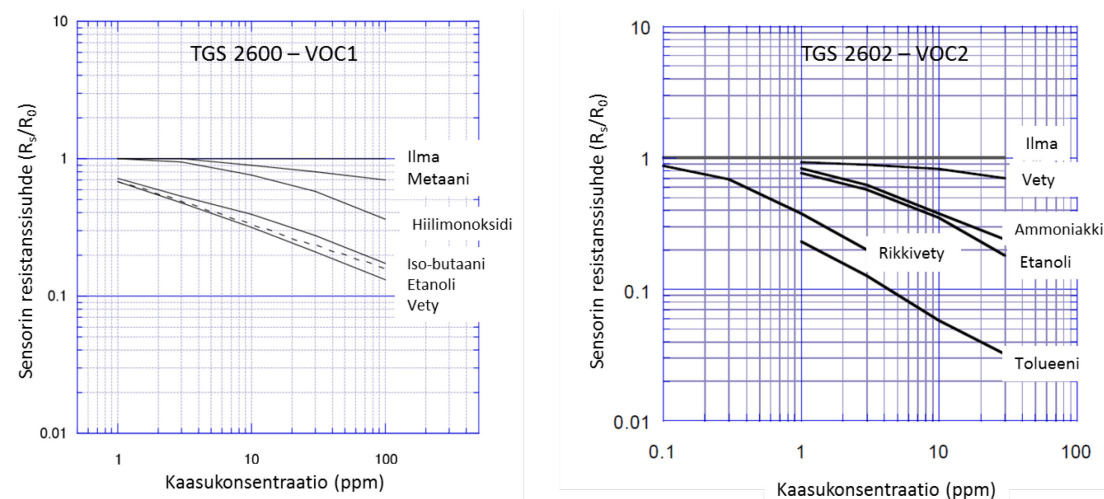
Kuva 22. Sisäilman vesihöyryn kondenssikeräyslaitteisto. A) Kylmälevy ja LAUDA eco RE 1050 viilennystermostaatti, b) keräysastia, c) keräysastiaan kondensoitunutta vettä.

4.2.7 VOC-mittauksissa käytetyt laitteet ja menetelmät

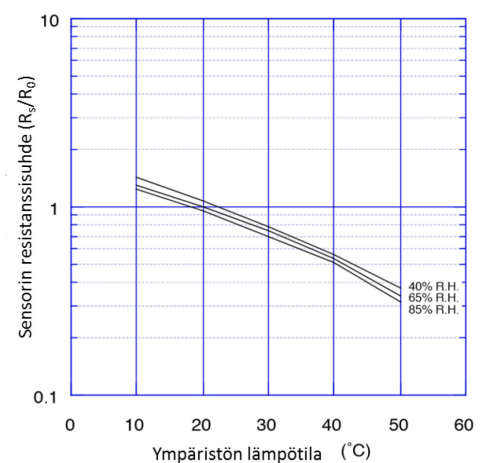
Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksien aikariippuvuuden selvittämiseksi mitattiin jatkuvatoimisilla kaasusensoreilla (Figaro TGS 2600 ja TGS 2602) sisäilmaa neljän viikon ajan. Mittaustulos tallennettiin kahden minuutin välein. Sensorien toiminta perustui sensorin puolijohteen johtavuuden muutoksiin riippuen detektoidun kaasun pitoisuudesta ympäröivässä ilmassa. Kaasupitoisuus [ppm] vaikutti resistanssisuhteeseen R_s/R_0 , jossa R_s on resistanssi (k Ω) mitattavassa tilassa ja R_0 resistanssi (k Ω) puhtaassa ilmassa.

Jokaisella kaasulla on oma kaasupitoisuuden riippuvuus resistanssisuhteesta (Kuva 23). Tämän vuoksi sensoreilla ei saatu mitattua usean yhdisteen kokonaispitoisuutta. Sensorien resistanssi on lämpötila- ja kosteusriippuvainen (Kuva 24). TGS 2600 - kaasusensori reagoi esimerkiksi vetykaasuihin, metanoliin, etanoliin, iso-butanoliin ja hiilimonoksidiin. TGS 2602 - kaasusensorilla on korkea sensitiivisyys matalilla pitoisuuksilla rikkivedylle, jota useat mikrobit tuottavat ja jota esiintyy viemärikaasuissa. Lisäksi sensori reagoi muun muassa ammoniakkiin, etanoliin ja tolueeniin.

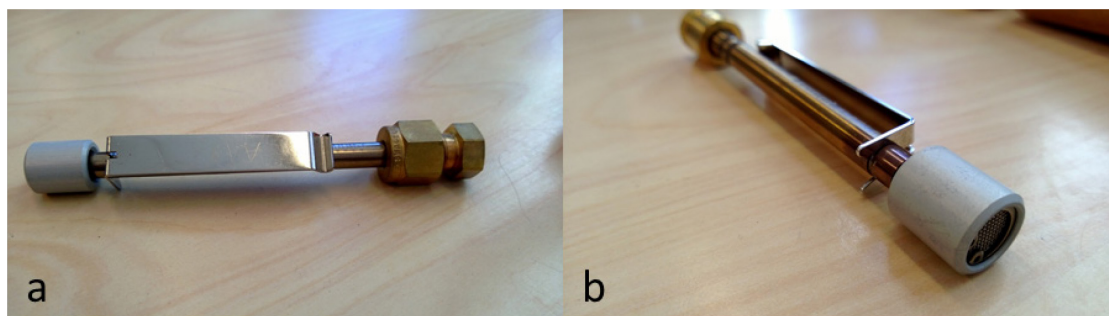
Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kvantitoimiseksi ja analysoimiseksi (GC-MS) eri ilmanvaihtotilanteissa otettiin ensimmäisen viikon kaasusensoreilla mitatun ajasta riippuvan käyttäytymisprofiilin perusteella kolme ilmanäytettä Tenax-adsorbentteihin (Tenax® TA Supelco) (Kuva 25) käyttäen ilmanäytepumppua (SKC Model 222), jonka virtaus oli 0,13 l/min.



Kuva 23. Figaron TGS 2600 ja TGS 2602 -kaasusensorien resistanssisuhteen (R_s/R_0) riippuvuus kaasupitoisuuksista (ppm) muutamilla kaasuilla (Figaro Product Information 2013).



Kuva 24. Figaro TGS 2602 -kaasusensorin resistanssisuhteen R_s/R_0 riippuvuus lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta (Figaro Product Information 2013).



Kuva 25. VOC-näytteenotossa käytetyt adsorbentit, a) Tenax-adsorbentti b) Air-Toxic-adsorbentti

Näytteet analysoitiin termodesorptio-kaasukromatografi-massaspektrometrilla (Perkin Elmer: ATD400, GC Clarus 580, MS Clarus 600T). Yhdisteet tunnistettiin AMDIS-ohjelman ja NIST 11 -massaspektrikirjaston avulla. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaismäärä (TVOC) sekä tunnistettujen yhdisteiden pitoisuus laskettiin tolueeniekvivalenteina. Nollanäytteen eli tyhjän Tenax-putken TVOC vähennettiin näytteiden TVOC:sta.

4.2.8 Hiilidioksidimittauksissa käytetyt laitteet ja menetelmät

Rakenteen sisäinen hiilidioksidipitoisuus mitattiin Vaisalan GM70-sarjan mittalaitteella, jossa oli GM70-pumppu ja vaihdettavat GMP221/222 mittapääet hiilidioksidipitoisuusalueille 0 – 7000 ppm ja 0 – 5 %. Mittalaitteeseen kiinnitettiin ontto teräksinen näytteenottoneula, jonka kautta vedettiin ilmaa rakenteen sisästä (Kuva 26).

Tilan ilmanvaihtuvuuden selvittämiseksi mitattiin ajasta riippuvia hiilidioksidipitoisuuksia (Tinytag TGE-0010 CO₂ logger 0–2000 ppm (Kuva 26)), ja mittaustulos tallennettiin 15 minuutin välein.



Kuva 26. Hiilidioksidimittarit. Vasemmalla Vaisalan GM70-hiilidioksidimittari ja näytteenottoneula ja oikealla Tinytag TGE-0010 hiilidioksidimittari ja -loggeri.

Tallennetuista tiedoista laskettiin ilmanvaihtokerroin n [1/h] yleisen sekoitusyhtälön (kaava 6) avulla.

$$c_s(t) = c_u + \frac{G}{n \cdot V} (1 - e^{-n \cdot t}) + (c_s(0) - c_u) \cdot e^{-n \cdot t} \quad (6)$$

jossa

$c_s(t)$	on hiilidioksidipitoisuus tarkasteluajan lopussa [ppm]
c_u	on ulkoilman hiilidioksidipitoisuus [ppm]
G	on hiilidioksidituotto tilassa [g/h]
n	on ilmanvaihtokerroin [1/h]
V	on huoneen tilavuus [m ³]
t	on aika [h]
$c_s(0)$	on hiilidioksidipitoisuus tarkasteluajanjakson alussa [ppm].

Tilaa tarkasteltiin ajanjaksoilta, jolloin tilasta oli juuri poistunut ihmiset ja tilan käytöstä johtuvaa hiilidioksidituottoa ei ollut. Tällöin tuotto G [g/h] voitiin asettaa nolllaksi, jolloin ilmanvaihtokertoimelle n [1/h] saatiin kaava 7.

$$n = \frac{\ln \left[\frac{c_s(t) - c_u}{c_s(0) - c_u} \right]}{-t} \quad (7)$$

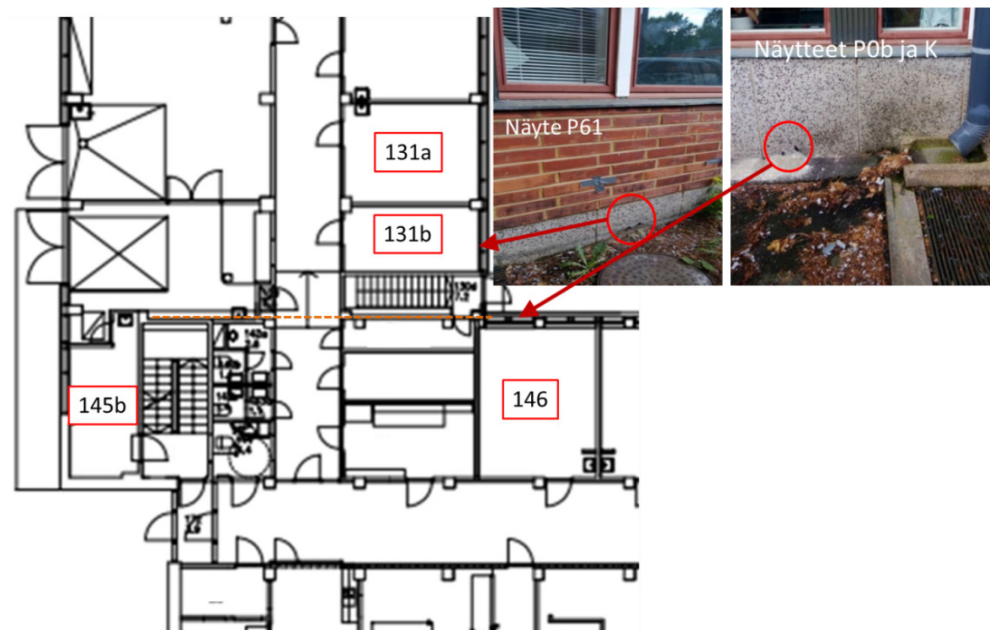
jossa

n	on ilmanvaihtokerroin [1/h]
$c_s(t)$	on hiilidioksidipitoisuus tarkasteluajan lopussa [ppm]
c_u	on ulkoilman hiilidioksidipitoisuus [ppm]
$c_s(0)$	on hiilidioksidipitoisuus tarkasteluajanjakson alussa [ppm]
t	on aika [h].

4.3 Koejärjestelyt ja aikataulu

4.3.1 Viljelynäytteet toksisuustutkimukseen

Viljelynäytteiden alkuperät, näytteiden laadut sekä ottopäivämäärät ja -paikat on koottu taulukkoon 10. Materiaalinäytteiden ottopaikat on merkitty kuvaan 27. Materiaalinäyte oli kairanäyte sokkelin korkkilevystä. Korkkilevynäytteet P0b ja P61 olivat yli vuoden vanhoja näytteitä, joita oli säilytetty kuivassa huonetilassa suljetuissa pusseissa.



Kuva 27. Materiaalinäytteiden P61, P0b ja K ottokohdat. Kuvassa näkyy lisäksi toimistohuoneiden 131a, 131b, 145b ja 146 sijainnit.

Taulukko 10. Viljelynäytteiden alkuperät, laadut, ottopäivämäärät ja -paikat.

Näytteet			
Alkuperä, huonenro	Laatu ja lukumäärä (n)	Ottopäivä	Ottopaikka
131b	Pöly (n=3)	5.2.2013	Johto-kourun ja valaisimen päältä
131b	Ilma (n=1)	21.3.2013	Tuloilmakanava
131b	Laskeumamalja	11.1.2013	Keskellä huonetta, 80 cm lattiatasosta
131a	Pöly (n=3)	5.2.2013	Johto-kourun ja valaisimen päältä
131a	Laskeumamalja	11.1.2013	Keskellä huonetta, 80 cm lattiatasosta
335	Pöly (n=1)	30.5.2013	Kirjahyllyn päältä
335	Laskeumamalja	30.5.2013	Keskellä huonetta, pöytätasolla
146	Pöly (n=1)	20.8.2013	Kirjahyllyn päältä
145b	Pöly (n=1)	20.8.2013	Hyllyn päältä
223	Pöly (n=1)	20.8.2013	Sermin päältä
134	Pöly (n=1)	20.8.2013	Kirjahyllyn päältä
P0b	Korkkilevy (n=1)	12.2011	Sokkelirakenne
P61	Korkkilevy (n=1)	12.2011	Sokkelirakenne
K	Korkkilevy (n=1)	30.4.2013	Sokkelirakenne

4.3.2 Sisäilman vesihöyryn kerääminen

Sisäilman vesihöyryä kondensoitiin kahdesta toimistohuoneesta ja kahdesta luokkahuoneesta.

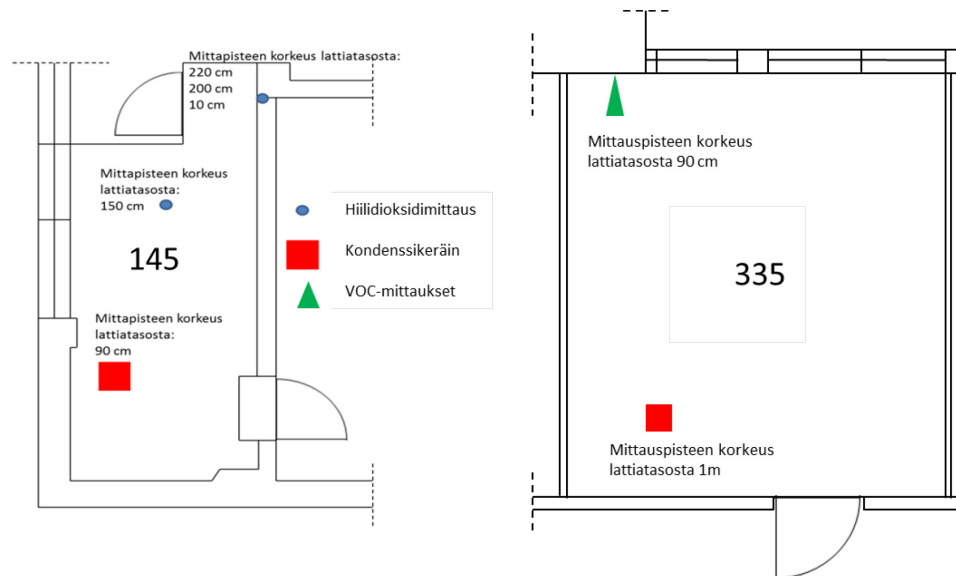
1. Toimistohuone 335: Huoneen ilmatilasta tiivistettiin kondenssikeräimellä ilman sisältämää vesihöyryä 3 vuorokauden ajan 30.8. – 2.9.2013. Huoneen sisäilman suhteellinen kosteus (RH) ja lämpötila (T) mitattiin ja arvot tallennettiin 15 minuutin välein.
2. Toimistohuone 145: Huoneen Kylmälevy käynnistettiin keskiviikkona 6.11.2013 klo 16 ja sammutettiin maanantaina 11.11.2013 klo 9. Mittauspisteiden sijainnit huoneessa on kuvassa 27.
3. Luokkahuoneet B1 ja B3

Huone B1: Keräys aloitettiin 9.10.2013 klo 13.30. Kylmälevyn korkeusasema oli 2,10 m lattiatasosta. Kondenssikeräysjaksolta dataloggerilla tallennettiin mittausjaksolta lämpötila ja suhteellinen kosteus. Keräys lopetettiin 14.10.2013.

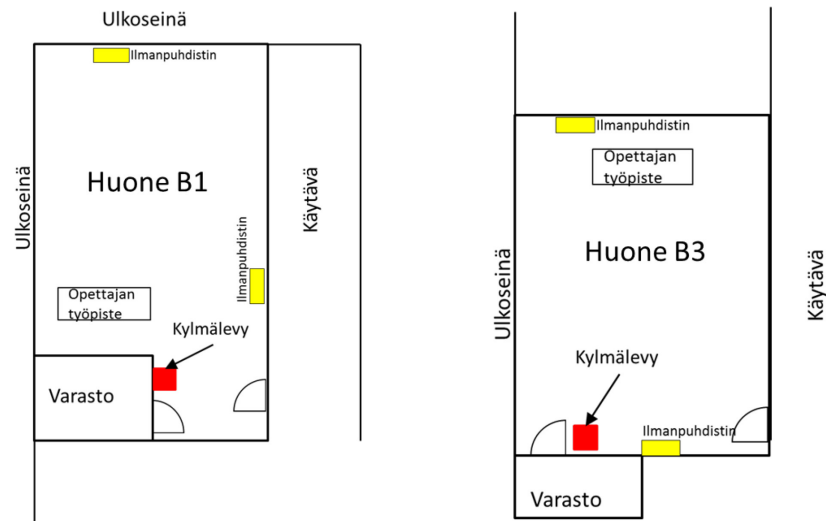
Huone B3: Keräys aloitettiin 14.10.2013 klo 13 ja lopetettiin 17.10.2013 klo 9.00. Kondenssikeräyslaitteen sijoitus luokkahuoneissa on kuvassa 29.

4. Verrokkivesi. Mittausmenetelmistä ja tarvikkeista johtuvan toksisuuden tarkastamiseksi toksisuusmittaukset tehtiin myös verrokkivedellä. Verrokkivesi oli

100 ml käänteisosmoosivettä (RO-vettä), joka laitettiin puhdistettuun (70 % etanoli) kondenssikeräysastiaan vuorokauden ajaksi alkaen 7.10.2013 klo 13.00. Astia peitettiin puhdistetulla (70 % etanoli + lämmitys 100 °C, 1h) alumiinifoliolla. Keräysastia asetettiin kylmälevyn päälle. Kylmälevyn lämpötilaksi asetettiin -2 °C. Keräysastian pintalämpötilaksi mitattiin +3 °C.



Kuva 28. Toimistohuoneiden mittauspisteiden sijainnit. Kondenssikeräimen sijainti huoneessa on merkitty punaisella neliöllä, hiilidioksidimittauspisteet sinisellä ympyrällä ja VOC-mittauspisteet vihreällä kolmiolla.



Kuva 29. Kondenssikeräimen kylmälevyn sijoitus luokahuoneissa B1 ja B3 on merkitty kuvissa punaisella. Ilmanpuhdistimien (Airstatic) paikat on merkitty keltaisella.

4.3.3 Haihtuvien orgaanisten aineiden mittausaikataulu

Ajasta riippuva VOC-mittaus Figaro-sensoreilla otettiin huoneesta 335 neljän viikon ajan alkaen 30.5.2013. Toimistohuoneiden ilmanvaihdon käyntiaika oli arkipäivisin 7.30 – 20.00 ja 22.00–7.30 ja viikonloppuisin 22.00–7.30. Adsorbenttinäytteet otettiin tiistaina 4.6.2013 (AA0) klo 10.32, lauantaina 8.6.2013 klo 20.00 (BB3), jolloin ilmanvaihto oli ollut yli 12 tuntia pois päältä sekä sunnuntaina 9.9.2013 klo 0.15 (AA3), jolloin ilmanvaihto oli ollut yli kaksi tuntia yötehoilla.

4.3.4 Homeiden CO₂-tuoton mittaus suljetussa kammiossa

Laboratoriokokeessa tutkittiin homeiden aineenvaihdunnasta aiheutuvaa hiilidioksidipitoisuuksien nousua suljetuissa kammioissa. Homeiden kasvualustaksi valittiin kipsilevy sen käytön yleisyyden vuoksi. Homelajeiksi valittiin toksiineja tuottavat *Trichoderma atroviride* 1/226 ja *Aspergillus westerdijkiae* PP2. Molempien alkuperä oli sisäilmaongelmaiset sisätilat (Andersson ym. 2013). Tähän tutkimukseen ne saatiin Helsingin yliopiston HAMBI-kokoelmasta.

Kammiokoesarja aloitettiin 7.6.2013. Kuusi kipsilevyn palaa (10 cm * 10 cm) steriloidtiin autoklaavilla. Autoklaavauksen jälkeen kipsilevyt kostutettiin. Kaksi kostutettiin autoklaavatulla vedellä (25 ml), kaksi 2 %:lla ammoniumkloridiliuoksella (25 ml) ja kaksi 2 %:lla kaliumnitraatilla (25 ml). Kolmelle eri seoksilla kostutetuille kipsilevyille siirrostettiin *Trichoderma atroviride* ja kolmelle *Aspergillus westerdijkiae*, kullekin levyille 2 ml suspensiota. Suspensio sisälsi 3 täyttä silmukallista mikrobikasvustoa 6 ml:ssa mallaslientä. Kukin kuudesta näytekappaleesta laitettiin erilliseen koekammioon. Koekammioiden numerointi ja kammion näytekappaleiden käsittely on taulukossa 11.

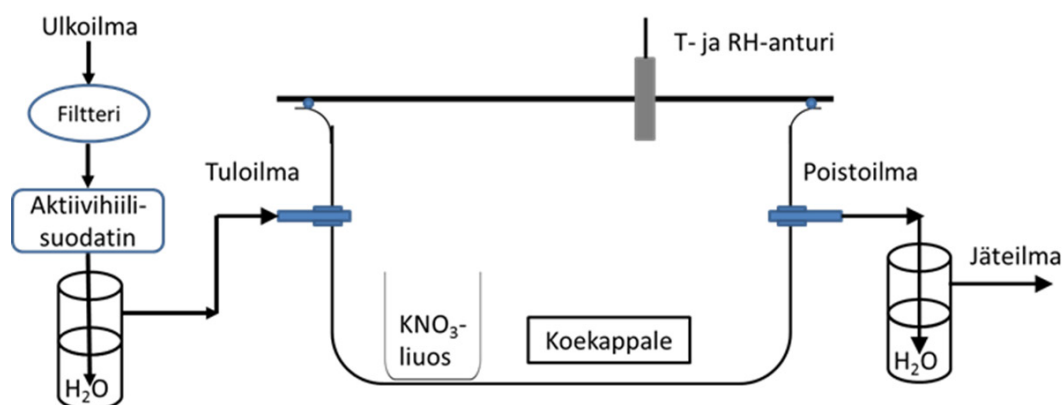
Kosteustasapainon säilyttämiseksi kammioihin laitettiin kaliumnitraattiliuos (KNO₃ 40 g RO-vedessä 100 ml), jottei suhteellinen kosteus laskisi alle 93 %. Kammioiden hiilidioksidin alkupitoisuus oli 570 ppm. Kammiot säilytettiin huonelämmössä.

Taulukko 11. Kipsilevykappaleiden käsittely

Kammionumero	Kipsilevyn kostutus	Siirrostettu homekanta
Kammio 1	KNO ₃ 2 %	<i>Aspergillus westerdijkiae</i> PP2
Kammio 2	H ₂ O	<i>Aspergillus westerdijkiae</i> PP2
Kammio 3	KNO ₃ 2 %	<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226
Kammio 4	NH ₄ Cl 2 %	<i>Aspergillus westerdijkiae</i> PP2
Kammio 5	H ₂ O	<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226
Kammio 6	NH ₄ Cl 2 %	<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226

Koekammiot olivat suljettuja. Kammioilman hiilidioksidipitoisuudet mitattiin 10.6.2013 lähtien. Koekammion ilma palautettiin takaisin kammioon mittauksen aikana.

18.7.2013 koekammiot tuuletettiin ulkoilman hiilidioksiditasoon. Ulkoa johdettiin ilmaa koekammioihin suodattimen (Durapore Membrane filter 0,22 µm GVHP) ja aktiivihiilisuodattimen (WhatmanTM CARBON-CAPTM) läpi. Tuloilma johdettiin kuplituspullon (RO-vesi) läpi kammion kosteuden säilyttämiseksi. Poistoilma johdettiin toisen kuplituspullon kautta ulkoilmaan. Periaate tuuleutuksesta on kuvassa 30. Hiilidioksidipitoisuuksien mittaamista jatkettiin vähintään kerran viikossa 20.9.2013 asti.



Kuva 30. Koekammion tuuletuksen periaate

Hiilidioksidipitoisuuden tilavuusosuudesta [ppm] laskettiin massapitoisuus kaavalla 8. Tilavuusosuusiksi massapitoisuuksiksi muunnettaessa käytettiin paineena yhtä ilmakehää eli 101,3 kPa ja lämpötilana 20 °C.

$$c_m = \frac{M}{V_m} * c_v \quad (8)$$

jossa	c_m	on massapitoisuus [mg/m ³]
	M	on moolimassa [g/mol], tässä $M(\text{CO}_2) = 44 \text{ g/mol}$
	V_m	on kaasun moolitilavuus [dm ³ /mol], tässä 24,1 dm ³ /mol
	c_v	on hiilidioksidipitoisuus tilavuusosuutena [ppm].

Hiilidioksidin massa [mg] kammiossa saatiin kaavalla 9

$$m_{\text{CO}_2} = V_{\text{kammio}} * c_m \quad (9)$$

jossa	m_{CO_2}	on hiilidioksidin määrä/massa kammiossa [mg]
	V_{kammio}	on kammion ilmatilavuus [m ³], tässä $12,5 * 10^{-3} \text{ m}^3$
	c_m	on hiilidioksidin laskettu massapitoisuus [mg/m ³].

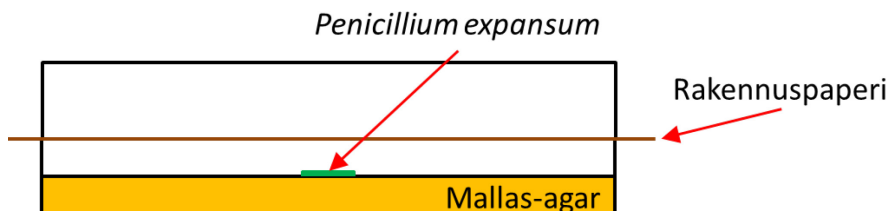
4.3.5 Homeen toksisten nestepisaroiden tuotto ja kulkeutuminen suljetussa ilmatilassa

Ilmanäytteiden keräysmenetelmien kehittämistä varten tutkittiin sisätilahomeen nestepisaroiden tuottoa ja niiden sisältämien toksiinien kulkeutumista biomassasta ilmatilaan. Korkkilevynäytteestä P61 eristetty nestepisaroita tuottava *Penicillium expansum* P61 siirrostettiin 3.12.2013 kuudelle mallas-agar-maljalle. Kaksi maljoista jätettiin suljettuina kasvamaan vetokaappiin, toinen maljoista agarkerros alaspäin ja toinen agarkerros ylöspäin. Kahteen maljaan asetettiin autoklaavattu rakennuspaperi maljan alustan ja kannen väliin siten, ettei se koskettanut kasvustoa eikä maljan kantta (Kuva 31).

Maljat suljettiin kiertämällä maalarinteippi kolmesti maljan ympäri ja jätettiin suljettuina vetokaappiin. Kaksi maljoista laitettiin avattuina suljettuihin lasikammioihin (kuvattu luvussa 4.2.2). Tavoitteena oli selvittää:

- onko ilmatilavuudella merkitystä homeen pisaratuottoon. Suljetussa maljassa ja suljetussa lasipurkissa kasvaneiden homeiden pisaratuottoa verrattiin. Lasipurkin ilmatilavuus oli noin 100-kertainen maljan ilmatilavuuteen verrattuna.
- toksiinien kulkeutumista ilmatilassa. Maljan kantta jäähdytettiin kasvustoa viileämmäksi, jolloin ilmatilan vesihöyry kondensoitui maljan kanteen. Kulkeutumismekanismien tutkimiseksi toinen maljoista asetettiin siten, että jäähdytetty kansi oli kasvuston alapuolella, toinen siten, että jäähdytetty kansi oli kasvuston yläpuolella.
- toksiinien siirtymistä rakennuspaperin läpi asettamalla maljan ilmatilaan autoklaavattu rakennuspaperi. Maljojen kansien jäähdytys suoritettiin samoin kuin kohdassa b.

Kokeen lopussa maljojen kansista kerättiin niihin kondensoituneet nestepisarot, jotka analysoitiin LC-MS:llä käyttäen ioniloukkudektoria.



Kuva 31. Sivukuva mallas-agar-maljasta, johon on siirrostettu *Penicillium expansum* ja kasvuston sekä maljan väliseen ilmatilaan on asetettu rakennuspaperi

5 Tulokset

5.1 Haitta-aineiden etsintä viljellyistä sisätilahomeista

5.1.1 Viljelmien toksisuus

Sisätilänäytteitä viljeltiin mallas-agarmaljoille, ja niistä kasvaneet homepesäkkeet tutkittiin toksisuuden suhteen. Tavoite oli selvittää, löytyykö eri tiloista erilaisia tai eri määriä toksiineja tuottavia homeita. Sisätilänäytteet otettiin saman rakennuksen seitsemästä toimistohuoneesta, joista neljässä oli ollut työntekijällä sisäilmaan liittyviä terveyshaittaoirevalituksia ja kolmessa ei ollut ollut.

Viljeltäviksi valittiin laskeutunutta pölyä, palanen ulkoseinärakenteen korkkilevyä sekä impaktorilla kerätty ilmanäyte. Pölynäyte kerättiin sterilillä pumpulipäätikulla vaakapinnalta steriiliin putkeen ja viljeltiin laboratoriossa mallas-agar-maljalla. Korkkilevyn pala, 1 g, ulkoseinärakenteen sisältä viljeltiin kontaktimaljalle. Impaktorinäytteessä otettiin 1-vaihekeräimellä 60 litraa ilmaa suoraan mallas-agar-maljalle.

Viljelymaljat suljettiin tarrateipillä. Maljoilla neljässä viikossa, huoneenlämmössä kasvaneista erillispesäkkeistä tehtiin uutteen. Jokaisen uutteen toksisuus tutkittiin käyttäen sian siittiötä toksisuusindikaattorina. Tulokset on koottu taulukkoon 12.

Toimistohuoneiden pölynäytteistä kasvaneista pesäkkeistä tutkittiin 70 erillispesäkettä, joista indikaattorisoluille toksisia oli 59 kappaletta. Huoneissa 145b, 146, 131a, 131b ja 335 ylivoimainen enemmistö, 63–100 % pesäkkeistä oli toksisia. Kahdesta huoneesta, 134 ja 223, toksisia pesäkkeitä ei löytynyt lainkaan.

Huoneen 146 korkkilevystä oli otettu kairanäytteet joulukuussa 2011 (P0b) ja uusi näyte uusi näyte huhtikuussa 2013 (K). Molemmista 75–100 % pesäkkeistä oli toksisia. Näytteen säilytys 1,5 vuoden ajan ei ollut hävittänyt toksisia homeita korkkilevystä. Korkkilevynäytteiden ottopaikat ovat kuvassa 27.

Osasta maljoja tehtiin puhdasviljelmät ja näin saadut kannat tunnistettiin mikroskoipimalla (Maria A. Andersson, Helsingin yliopisto.) Osa kannoista lähetettiin identifioitavaksi Szegedin yliopistoon (László Kredics, Unkari). Tunnistetut lajit ovat taulukossa 13.

Mikroskoipimalla tunnistettiin *Aspergillus versicolor*, *Chaetomium sp.*, *Penicillium expansum*, *Penicillium sp.*, *Rhizopus sp.* ja *Aspergillus niger*. ITS-sekvenssin perusteella tunnistettiin *Acrostalagmus sp.* ja *Aspergillus ustus*. Toksiinituottoa ei havaittu kannoista *Rhizopus sp.* ja *Penicillium sp.*

Taulukosta 13 selviää, että niistä viidestä huoneesta, joissa pääosa kasvaneista pesäkkeistä osoittautui toksisiksi, toksiinia tuottavia *Aspergillus*-lajeja oli kolme. Sen lisäksi tunnistettiin kolme muuta toksiinintuottajasukua, *Acrostalagmus*, *Chaetomium* ja *Penicillium*. Huonepölyssä oli monipuolinen toksiinintuottajalajisto.

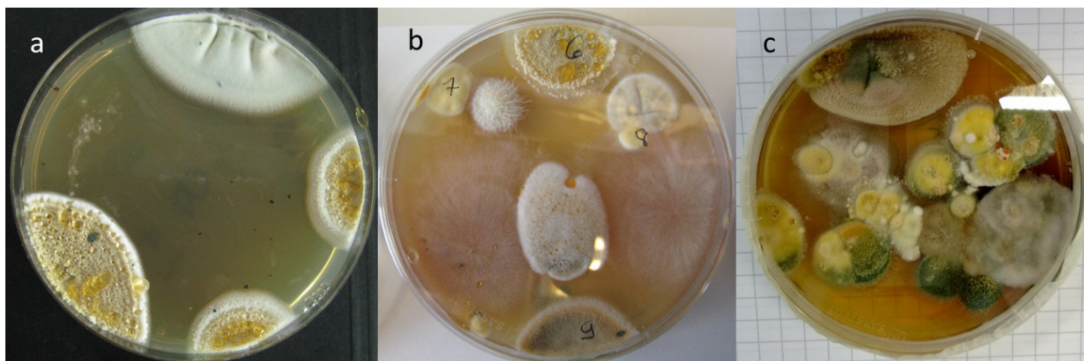
Taulukko 12. Toimistohuoneiden laskeutuneista pölystä ja materiaalinäytteistä mallas-agarille kasvaneiden homepesäkkeiden toksisuudet.. Taulukossa on ilmoitettu toksiineja tuottavien pesäkkeiden osuudet kaikista tutkituista pesäkkeistä. Toksinen pesäke tarkoittaa todettua toksisuutta vähintään yhdellä solutoksikologisella testillä (4.2.5).

Näytteet		Toksiset pesäkelöydökset			Lisätietoja
Alkuperä huonenro ja pinta-ala	Laatu	Lukumäärä/ kpl tutkittuja	Toksisten osuus [%]	Tutkittujen osuus kaikista erinäköisistä pesäkkeistä [%]	
131b 11,7 m ²	Pöly	26/30	87	90	Huone pois käytöstä 2/2010 lähtien terveyshaittaoireiden vuoksi
131a 18 m ²	Pöly	5/6	83	100	Huone pois käytöstä 2/2010 lähtien terveyshaittaoireiden vuoksi
335 30 m ²	Pöly	10/16	63	80	Huone pois käytöstä terveyshaittaoireiden vuoksi
146 26 m ²	Pöly	11/11	100	100	Huone käytössä, ei haittaoirevalituksia
145b 18 m ²	Pöly	7/7	100	100	Huone käytössä, haittaoirevalituksia
223 28 m ²	Pöly	0/2	<1	100	Huone käytössä, ei haittaoirevalituksia
134	Pöly	0/5	<1	100	Huone käytössä, ei haittaoirevalituksia
P0b	Korkkilevy	26/27	96	100	Huoneen 146 ulkoseinästä
P61	Korkkilevy	4/4	100	100	Huoneen 131b ulkoseinästä
K	Korkkilevy	3/4	75	100	Huoneen 146 ulkoseinästä

Taulukko 13. Viljelyssä tunnistetut homelajit ja pesäkemäärät. Viljely tehtiin huonelämmössä mallas-agar-maljoilla neljä viikkoa. Tunnistus perustui morfologiaan. Tähdellä* merkityt tuottivat kasvatusmaljalla toksiineja. ∞ tarkoittaa, että malja oli kasvanut niin täyteen, ettei pesäkkeitä voinut laskea. Sp = sukutason tunnistus.

Näytteet				Pesäkelöydökset		
Alkuperä, huonenro	Laatu ja lukumäärä (n)	Otto-päivä	Otopaikka	Erinäköisten pesäkkeiden lukumäärä [kpl]	Tunnistetut lajit ja toksiinintuotto* maljalla	kpl/malja
131b	Pöly (n=3)	5.2.2013	Johto-kourun ja valaisimen päältä	7	<i>Aspergillus versicolor</i> * <i>Aspergillus ustus</i> * <i>Chaetomium sp</i> * <i>Penicillium expansum</i> * <i>Acrostalagmus sp</i> *	13 4 5 3 2
131b	Ilma (n=1)	21.3.2013	Tuloilma-kanava	0		
131b	Laskeuma-malja	11.1.2013	Keskellä huonetta, 80 cm lattiatasosta	0		
131a	Pöly (n=3)	5.2.2013	Johto-kourun ja valaisimen päältä	1	<i>Penicillium sp</i> *	9
131a	Laskeuma-malja	11.1.2013	Keskellä huonetta, 80 cm lattiatasosta	0		
335	Pöly (n=1)	30.5.2013	Kirjahyllyn päältä	>7	<i>Aspergillus versicolor</i> *	9
335	Laskeuma-malja	30.5.2013	Keskellä huonetta, pöytätasolla	1	<i>Acrostalagmus sp</i> *	∞
146	Pöly (n=1)	20.8.2013	Kirjahyllyn päältä	1	<i>Chaetomium sp</i> *	∞
145b	Pöly (n=1)	20.8.2013	Hyllyn päältä	3	<i>Chaetomium sp</i> * <i>Aspergillus niger</i> *	∞
223	Pöly (n=1)	20.8.2013	Sermin päältä	1	<i>Rhizopus sp</i>	∞
134	Pöly (n=1)	20.8.2013	Kirjahyllyn päältä	3	<i>Rhizopus sp</i> <i>Penicillium sp</i>	∞
P0b	Korkkilevy (n=1)	12.2011	Ulkoseinä-rakenne	3	<i>Acrostalagmus luteoalbus</i> *	∞
P61	Korkkilevy (n=1)	12.2011	Ulkoseinä-rakenne	2	<i>Penicillium expansum</i> *	3
K	Korkkilevy (n=1)	30.4.2013	Ulkoseinä-rakenne	2	<i>Aspergillus versicolor</i> * <i>Acrostalagmus sp.</i> *	∞

Korkkilevynäytteistä tunnistettiin kolme toksinia tuottavaa lajia *Penicillium expansum*, *Aspergillus versicolor* sekä *Acrostalagmus luteoalbus*. Samat kolme lajia löytyivät myös huonepölyistä. Maljaviljelmien valokuvat korkkilevynäytteestä P61 ja huoneiden 131b ja 335 pölynäytteistä ovat kuvassa 32. Huoneen 131b sokkelirakenteen korkkilevynäytteestä P61 kasvoi 3 *Penicillium expansum* -pesäkettä (Kuva 32 a), joka löytyi myös saman huoneen pölynäytteestä (Kuva 32 b, pesäkenumero 6).



Kuva 32. Viljelty näytteet maljoilla 4 viikon iässä. Osa pesäkkeistä tuottaa aineenvaihdunnassaan nestepisaroihin. A) Korkkilevynäyte P61 b) pölynäyte huoneesta 131b c) pölynäyte huoneesta 335.

5.1.2 Sisätilojen viljelynäytteistä tunnistetut hometoksiinit

Erillispesäkkeistä tehtyjen puhdasviljelmien biomassasta massaspektrometrisesti tunnistetut toksiniit on koottu taulukkoon 14.

Korkkilevystä (näyte K) eristetyt *Aspergillus versicolor* K20 -kannan EC₅₀ sian munuaisepiteelisoluille (PK-15) oli matala, 0,9 µg/ml kahden vuorokauden altistusajalla ja siittiöille yli 100 µg/ml. Korkea toksisuus PK-15 -soluille selittyi, kun liuoksesta tunnistettiin sterigmatokystiini. Korkkilevystä (näyte P0b) eristetyt *Acrostalagmus luteoalbus* P0b8 -kannan EC₅₀ sian munuaisepiteelisoluille (PK-15) oli 8 µg/ml kahden vuorokauden altistusajalla. Toksisuutta ei havaittu sian siittiöille. Uutteesta tunnistettiin toksineja melinasidiini II, III ja IV. Huoneen 131b eristetty *Aspergillus ustus* tuotti erittäin myrkyllisiä ofioboliineja, joiden EC₅₀ sekä siittiöille että PK-15-soluille < 1 µg/ml.

Taulukko 14. Sisätilänäytteiden homeviljelmien toksisuus ja tunnistetut toksiinit. Toksisuus määritettiin liuoksesta indikaattorisoluina sian siittiöt ja munuaisepiteelisolut (PK-15). EC₅₀ on pitoisuus, joka vaurioittaa > 50 % soluista ilmoitettuna altistusajana. Alimpana taulukossa on vertailun vuoksi kaupallisesti saatava desinfioiva biosidi triklosaani.

Tutkittu kanta		Toksisuus		Tunnistetut toksiinit* homeliuoksessa
		EC ₅₀ [µg/ml]		
Tunnistus	Alkuperä	Siittiöt 1 d	PK-15 2 d	
<i>Aspergillus versicolor</i> K20	Korkkilevy K	-	0,9	sterigmatokystiini
<i>Acrostalagmus luteoalbus</i> P0b8	Korkkilevy P0b	-	8	melinasidiini II melinasidiini III melinasidiini IV
<i>Acrostalagmus</i> sp.	Laskeumamalja huone 335	-	15	ei vielä tunnistettu
<i>Chaetomium</i> sp MH1	Pöly huone 131b	35	40	ketoglobosiini
<i>Aspergillus ustus</i> MH4	Pöly huone 131b	1	0,8	ofiobolin K ofiobolin H
Triklosaani	Desinfioiva biosidi	1–2	8	

*Massaspektrometrin tunnistus Raimo Mikkola, Aalto-yliopisto.

5.1.3 Tulosten tarkastelu viljelynäytteistä

Kenttäkokeissa tutkittiin yhden toimistorakennuksen muutamaa huonetta eivätkä tulokset ole tilastollisesti merkitseviä. Tuloksia voidaan soveltaa yksittäismittauksena toteamaan, että samankin rakennuksen sisällä on huoneita, joissa valtaosa sisäilmassa olleista ja tasolle laskeutuneista homeitiökannoista on toksisia ja huoneita, joissa toksiineja tuottavien kantojen itiöitä ei todettu. Tämän perusteella voisi olla mahdollista luokitella tiloja toksiinintuottajakantojen suhteen ja tarkastella toksiinintuottajakantojen keskittymistä rakennuksessa. Sisätilänäytteet olivat useissa huoneissa vain yksittäisiä näytteitä ja yhdestä kohdasta huonetta. Useampi näyte samasta huoneesta olisi antanut lisävarmuutta tuloksiin.

5.2 Sisäilman vesihöyry haitta-aineiden kuljettajana

5.2.1 Kondensoidun veden keräys sisäilmasta

Huoneilman sisältämän vesihöyryn kuljettamien epäpuhtauksien tutkimiseksi kerättiin neljästä huoneesta ilman sisältämää vesihöyryä kondensoimalla vesihöyryä kylmälevyllä. Neljästä tutkitusta huoneesta kaksi oli toimistohuonetta (335 ja 145b) ja kaksi koululuokkaa (B1 ja B3). Kaikissa valituissa tiloissa oli ollut haittaoirevalituksia sisäilmaan liittyen. Huoneilman sisältämää vesihöyryä kondensoitiin, ja kondenssivesi kerättiin tätä varten suunnitellulla laitteistolla (4.2.6)

-2 °C kylmälle tasopinnalle asetettuun teräsastiaan, jonka pinta-ala oli 13 dm² ja pintalämpötila 3 °C.

Tutkittujen tilojen lämpötila- ja kosteusolosuhteet mitattiin ja tallennettiin 15 minuutin välein kondenssikeräysajanjaksolta (Kuva 33). Näistä tiedoista laskettiin tilojen sisäilman kosteuspitoisuudet [g/m³] (kaavat 6 ja 7) (Kuva 34). Tulokset on koottu taulukkoon 15. Käyttäjistä ja ilmanvaihdosta aiheutuvan hiilidioksidipitoisuuden vaihtelun selvittämiseksi luokkahuoneesta B3 mitattiin myös luokkahuoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuus 15 minuutin välein keräysjakson ajalta.

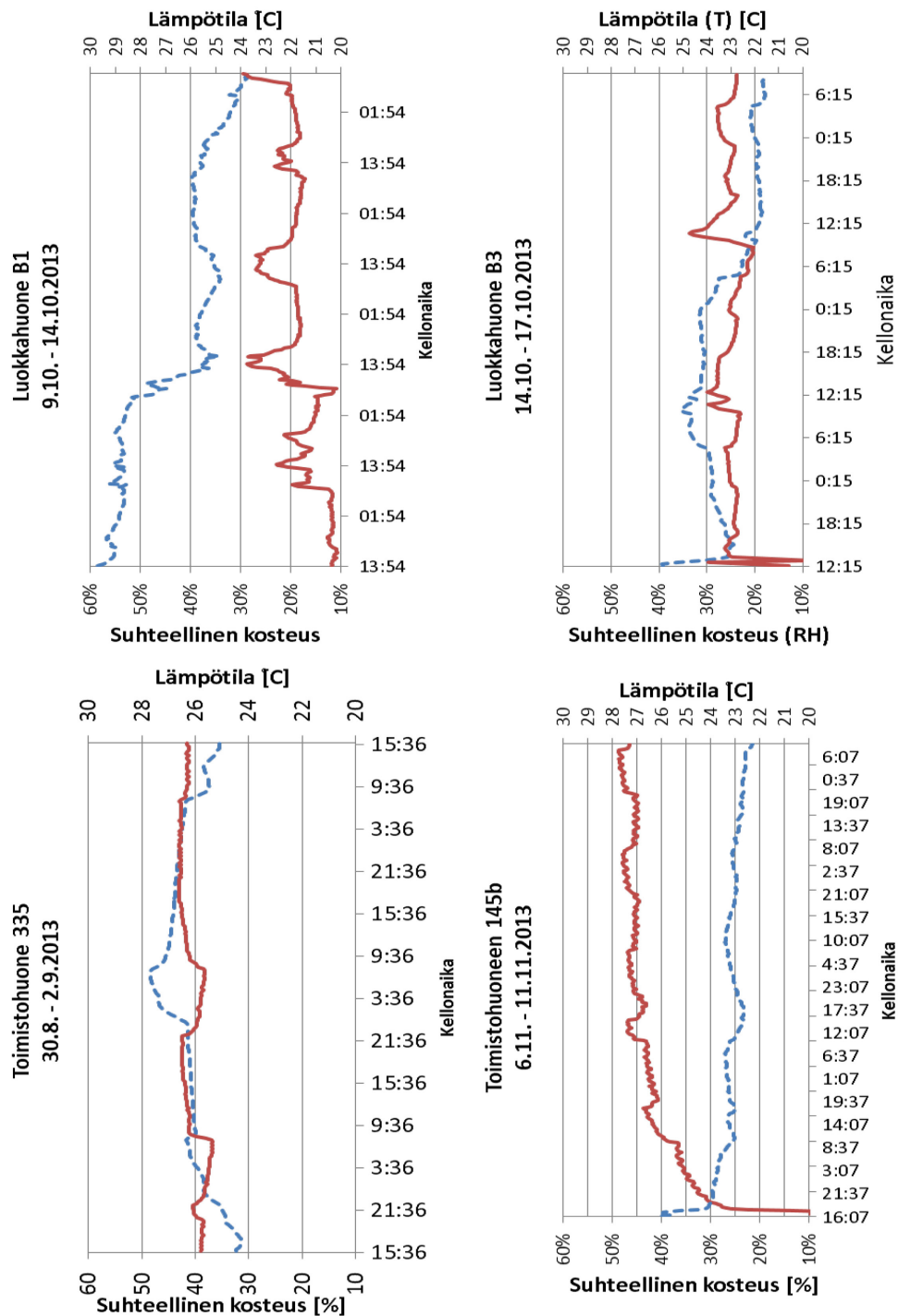
Taulukko 15. Toimistohuoneista 335 ja 145b sekä luokkahuoneista B1 ja B3 sisäilmasta mitatut (mittaus ja tallennus 15 minuutin välein) suhteelliset kosteudet (RH) [%] ja lämpötilat (T) [°C], lasketut vesihöyrypitoisuudet (v_s) [g/m³] sekä kondensoituneen veden saanti [ml] 3–5 d kestoilla keräysjaksoilla. Taulukossa mittausten maksimi- ja minimiarvot (Max), minimiarvot (Min) ja keskiarvot (Ka.).

Huoneen numero ja tilavuus	Keräysaika	RH [%]			T [°C]			v _s [g/m ³]			Saanti vettä [ml]
		Max	Min	Ka.	Max	Min	Ka.	Max	Min	Ka.	
335 84 m ³	30.8. - 2.9.2013	49	32	40,8	26,6	25,3	26,1	11,6	7,6	9,9	68
145b 45 m ³	6.11. - 11.11.2013	40	21,6	25,8	27,8	18,2	26,6	7,0	5,6	6,5	7
B1 210 m ³	9.10. - 14.10.2013	59	29	43	23,9	20,2	21,7	11,1	5,8	8,2	50
B3 187 m ³	14.10. - 17.10.2013	39	18	26	24,8	19,7	23,0	7,8	3,6	5,3	0

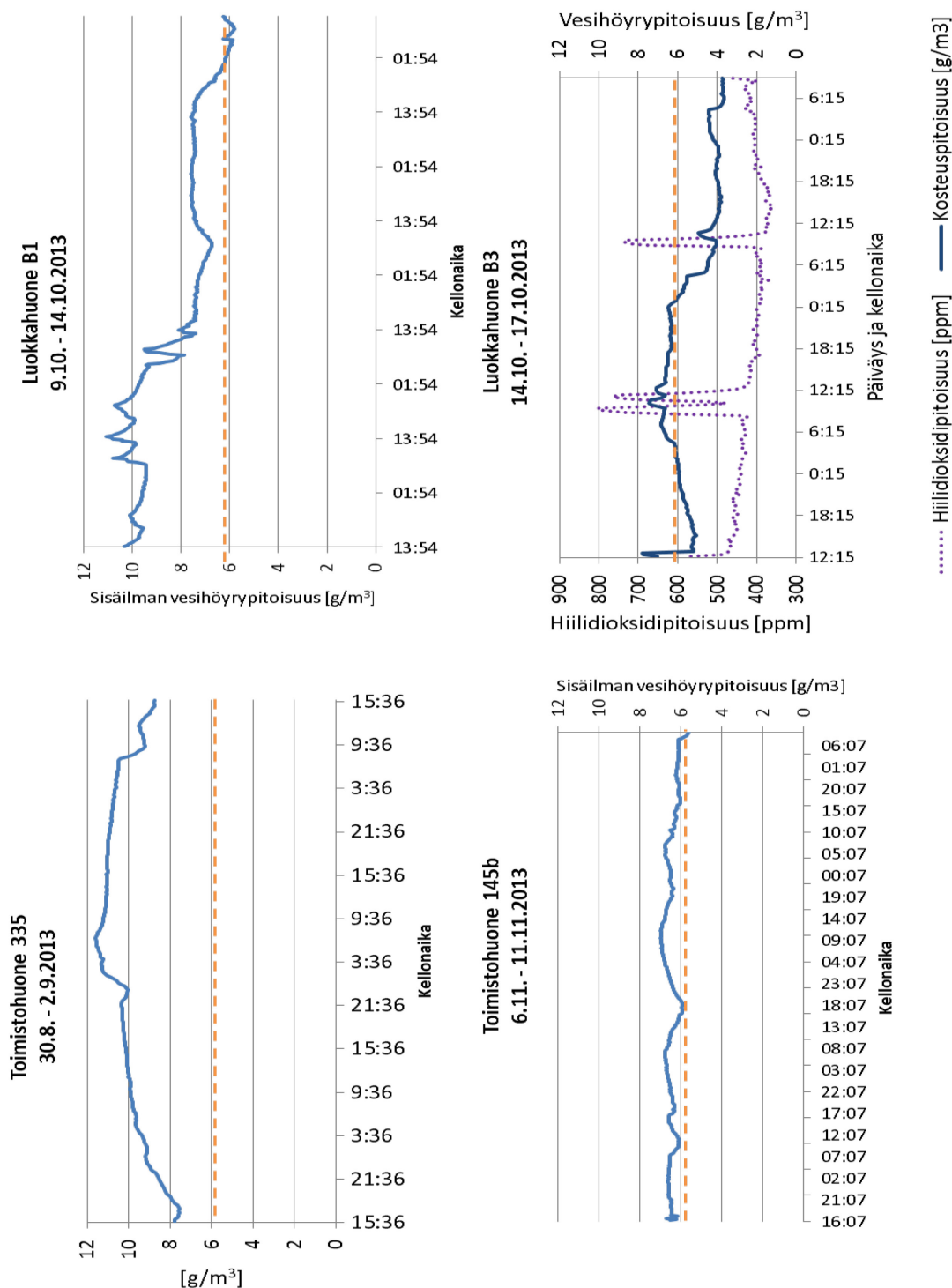
Keräysveden saanti eri tiloista oli 0–68 ml. Pienin saanti, 0 ml tuli tilasta, jossa ilman kosteuspitoisuus ylitti keräysastian pintalämpötilaa vastaavan kriittisen kosteuspitoisuuden, 6 g/m³, vain hyvin lyhyen aikaa. Suurin saalis, 68 ml saatiin tilasta, jossa vesihöyrypitoisuus oli koko keräysjakson ajan yli kriittisen kosteuspitoisuuden ja keräysjakson keskiarvo oli 9,9 g/m³. Kondenssiveden saanti riippuu tilan kosteuspitoisuudesta (Kuva 35). Lisäksi todettiin, että kosteuspitoisuuden alittaessa keräysastian lämpötilaa vastaavan kriittisen kosteuspitoisuuden, jo kondensoitunut vesi pääsi haihtumaan.

Kondenssivesien saantia vastaavat ilmatilavuudet laskettiin keräysjaksolla olleen sisäilman vesihöyrypitoisuuden keskiarvon ja keräysastian pintalämpötilan mukaisen kriittisen kosteuspitoisuuden erotuksena. Tulokset osoittivat, että ilmatilavuudet (17,5–22,7 m³) (Taulukko 16) olivat lähes samankokoiset, vaikka kondenssiveden saantimäärät olivat erilaiset.

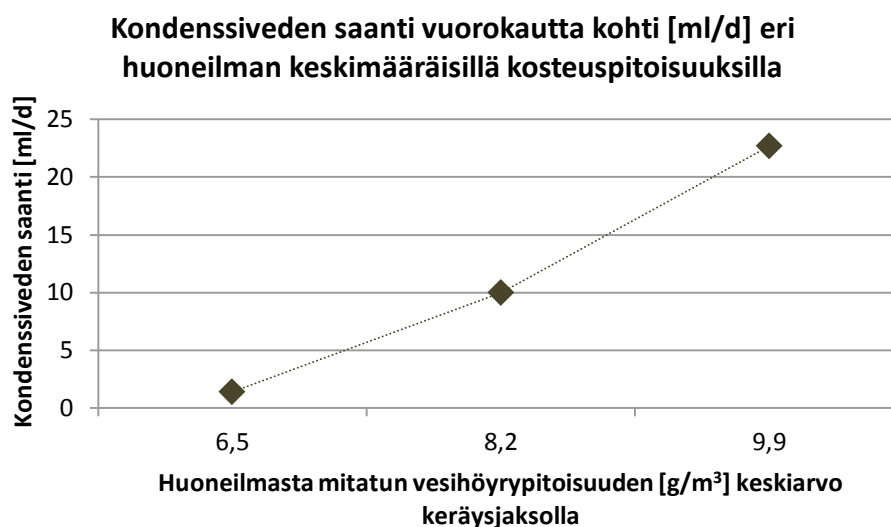
Hiilidioksidipitoisuus luokassa B3 oli 364–802 ppm. Hiilidioksidipitoisuusvaihtelun tuloksista todettiin ilmanvaihdon olleen riittävä käyttötarkoitukseen. Samalla todettiin, että tilan kosteuspitoisuus ilmakuutiota kohden nousi noin 1 g luokkahuoneen käytön aikana. Muuten tilan kosteuspitoisuus noudatti ulkoilman kosteuspitoisuuden vaihtelua.



Kuva 33. Sisäilman lämpötilat (T)[°C], ja suhteelliset kosteudet (RH) [%] kondenssikeräysjaksojen aikana neljässä tutkitussa tilassa. Punainen jatkuva viiva on lämpötila ja sininen katkoviiva suhteellinen kosteus. Tiloista kaksi oli toimistohuoneita ja kaksi luokkahuoneita.



Kuva 34. Kondenssikeräysjaksojen sisäilman vesihöyrypitoisuus [g/m^3] tutkituissa tiloissa. Vesihöyrypitoisuus on laskettu lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaustuloksista (Kuva 33). Kosteuspitoisuus on merkitty sinisellä jatkuvalla viivalla ja hiilidioksidipitoisuus (luokkahuone B3) violetilla pisteviivalla. Kaavioihin on merkitty oranssilla katkoviivalla kondenssikeräysastian pintalämpötilan mukainen kriittinen kosteuspitoisuus (6 g/m^3).



Kuva 35. Vuorokausikohtainen kondenssiveden saanti [ml/d] toimistohuoneista 335 ja 145b sekä luokkahuoneesta B1. Ilman vesihöyrypitoisuudet ovat taulukossa 11. Luokkahuoneesta B3 kondensoidun veden nettosaanti oli 0.

5.2.2 Sisäilmasta tiivistetyn veden analysointi

Kondenssikeräysastioihin kertyneet vedet otettiin talteen ilmasta kondenssiveteen kulkeutuneiden epäpuhtauksien tutkimista varten (Kuva 36 a). Kondenssivesi sekä etanoliin liuotettu keräysastian laitoihin tarttunut aines tutkittiin molemmat erikseen, jälkimmäinen etanoliin liuotettuna. Molemmista jakeista tutkittiin fluoresenssi, punnittiin haihdutusjäännös ja mitattiin toksisuus solutesteillä. Lisäksi toksisiksi osoittautuneet jakeet analysoitiin LC-MS -tekniikalla.

Mustavalolampulla, aallonpituus 360 nm, tarkasteltaessa todettiin kondenssivesien fluoresoivan sinisenä (Kuva 36 b). Kondenssiveden sininen fluoresenssi viittaa veden sisältävän vesiliukoisia epäpuhtauksia, joita ei ollut verrokkina käytetyssä laboratorion käänteisosmoosivedessä (RO-vesi).



Kuva 36. Työtilan 335 sisäilmasta kerätty kondenssivesi, kiinteä haihdutusjäännös sellaisenaan sekä etanoliin liuotettuna sisälsivät fluoresoivia aineita. A) Päivänvalossa kuvattu kondenssivesi (vasen) ja RO-vesi (oikea) b) mustavalolampun valossa 360 nm kuvattu kondenssivesi (vasen) ja RO-vesi (oikea) c) kiinteä haihdutusjäännös ja d) haihdutusjäännös metanoliin liuotettuna mustavalolampun valossa kuvattuna. Kuva: Maria Andersson.

Huoneiden 145b, B1 ja B3 kondenssivedet ja niiden haihdutusjäännökset fluoroivat samantapaisesti sinisenä kuin huoneen 335 vastaavat näytteet.

Kondenssivesien haihdutusjäännösten punnitustulokset ja niitä vastaavat sisätilojen ilmamäärät on koottu taulukkoon 16.

Taulukko 16. Yhteenvedo neljän tutkitun tilan ilmasta kondensoitujen vesien ja haihdutusjäännösten määristä sekä niitä vastaavista ilmamääristä.

Huoneen numero ja tilavuus	Keräysolosuhde				Saanti			
	Kesto	Keskiarvo			Tiiviste- veden määrä	Vastaa ilma- tilavuutta	Vesi- liukoinen aines	Veteen liukenematon aines
		RH	T	v_s				
		[d]	[%]	[°C]	[g/m ³]	[ml]	[m ³]	[mg]
Toimisto 335 84 m ³	3	40,8	26,1	9,9	68	17,5	1	
Toimisto 145b 45 m ³	4,5	25,8	26,6	6,5	7	17,5	0,3	1,3
Luokka B1 210 m ³	5	43	21,7	8,2	50	22,7	0,6	1
Luokka B3 187 m ³	3	26	23,0	5,3	0		-	0,33
Verrokki- vesi	1				100		0,4	

Tulokset osoittavat, että yhteenlaskettu vesiliukoinen ja veteen liukenematon aines olivat 1,6 mg kerättyä 20 ± 3 m³ vastaavaa ilmatilavuutta kohti eli noin 80 µg/m³ huoneissa 145b ja B1. Huoneesta 335 veteen liukenematonta ainesta ei otettu talteen. Huoneesta B3 ei saatu vesiliukoista ainesta erillisenä talteen veden haihtumisen vuoksi.

5.2.3 Sisäilmasta tiivistetyn veden toksisuuden tutkiminen

Toksisuustestit

Ilmassa vesihöyryn mukana liikkuvien aineiden mahdollista haitallisuutta tutkittiin mittaamalla kondenssivesien haihdutusjäännösten toksisuutta. Toksisuusindikaattoreina käytettiin sian siittiöitä ja munuaisepiteelisoluja (PK-15) ja hiiren hermosoluja (MNA). Tulokset on koottu taulukkoon 17.

Taulukko 17. Sisäilmasta kerättyjen kondenssivesien toksisuudet solutesteillä mitattuna. Toksisuusindikaattorina käytettiin sian siittiötä ja munuaisepiteelisoluja (PK-15) ja hiiren hermosoluja (MNA). Mitatut end-pointit olivat liikkuvuus (sian siittiöt) ja kasvun lakkaaminen (PK-15 ja MNA). Verrokkivesi on RO-vettä, jota pidettiin keräysastiassa foliolla peitettynä vuorokauden ajan kondenssikeräyksen lämpötila-asetuksilla.

Näyte	vaikuttava parametri	EC ₅₀		
		Kasvun lakkaaminen		Liikkeen lakkaaminen
		MNA-soluille 3 d	PK-15-soluille 3 d	sian siittiöille 1 h
		[µg/ml]	[µg/ml]	[µg/ml]
RO-vesi		≥ 100	≥ 100	≥ 50
335	Vesiliukoinen jae	10	80	15
145b	Vesiliukoinen jae	13	50	>25
145b	Veteen liukenematon jae	108	215	≥ 108
B1	Vesiliukoinen jae	≥ 100	≥ 100	≥ 50
B1	Veteen liukenematon jae	≥ 200	≥ 200	≥ 100
B3	Veteen liukenematon jae	25	50	> 25

*Toksiset löydökset merkitty punaisella

Toimistohuoneen 335 sisäilmasta kondenssikerätty vesi oli toksista hermosoluille (MNA) sekä sian siittiöille. Liuoksen EC₅₀ MNA-soluille oli 10 µg/ml ja PK-15 -soluille 80 µg/ml, kun altistusaika oli 3 vuorokautta sekä sian siittiöille 15 µg/ml, kun altistusaika oli yksi tunti. Huoneen 335 ilmasta kerättiin 1000 µg vesiliukoista ainetta, joka oli peräisin 17,5 m³:stä ilmaa. Näin ollen vesiliukoisen aineen pitoisuus ilmassa oli 60 µg/m³. Tämä aine lamautti siittiöiden liikkeen altistuspitoisuudessa 15 µg/ml.

Toimistohuoneen 145b sisäilma sisälsi 17 µg/m³ vesihöyryn kuljettamaa vesiliukoista ainetta, joka oli myrkyllistä hiiren hermosoluille (MNA) sekä sian munuaisepiteelisoluille (PK-15). Koululuokasta B1 kondenssikerätty vesi ei ollut myrkyllistä millekään kohdesolulle. Koululuokasta B3 saatu kondenssiastian etanolihuuhe oli myrkyllistä hermosoluille (MNA) sekä epiteelisoluille (PK-15).

Kemiallisessa (LC-MS/MS) analysoinnissa kondenssikerätyistä vesistä ei löydetty tunnistettavia yhdisteitä.

5.2.4 Sisätilahomeiden toksiset nestemäiset aineenvaihduntatuotteet

Osa sisätiloista eristetyistä puhtasviljelmistä eritti viljelymaljalla aineenvaihduntatuotteita sisältäviä nestepisaroita. Nestepisaroita voitiin kerätä pipetillä kasvustosta ja niiden toksisuus mitata suoraan ilman uutteen tekemisiä.

Pisaroiden sisällön toksisuutta tutkittiin neljällä eri indikaattorisolulla: sian siittiö, sian munuaisepiteelisolu (PK-15), hiiren hermosolu (MNA) ja kissan sikiön keuhkosolu (FFL). Korkkilevystä (näyte P61) *Penicillium expansum* P61 -kanta tuotti pisaroita, jotka sisälsivät kommunesiineja A, B ja D 1 % sekä ketoglobosiinia 5,6 % metanoliin liukenevasta kuivapainosta. Pysätykset olivat toksisia kaikille kohdesoluille (Taulukko 18) vielä 1000–10000 -kertaisina laimennoksina.

Taulukko 18. *Penicillium expansum* P61 -kannan tuottamien nestepisaroiden toksisuus. Pisanesteestä tehtiin sarjalaimennokset, joiden toksisuudet tutkittiin neljällä eri indikaattorisolulla: sian siittiöt, sian munuaisepiteelisolut (PK-15), hiiren hermosolut (MNA) ja kissan sikiön keuhkosolut (FFL). Toksisuustiitteri ilmaisee pisanesteen suurimman laimennoksen (vol/vol), jossa toksinen vaikutus todettiin.

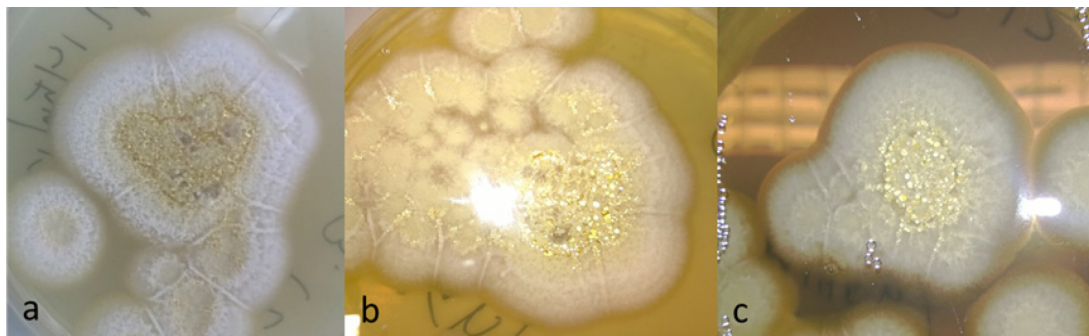
Indikaattorisolu	Toksisuustiitteri [µl/µl]	Toksisuusvaikutus
Siittiöt	>1000	Liikkeen loppuminen
PK-15	10000	Solukuolema
MNA	5000	Solukuolema
FFL	10000	Solukuolema

5.2.5 Rakennushomeen tuottamien toksiinien kulkeutuminen ilmatilassa

Ilmanäytteiden keräysmenetelmien kehittämistä varten tutkittiin homeiden tuottamien toksisten nestepisaroiden tuottoa ja toksiinien kulkeutumista ilmatilassa. Homeiden tuottamien nestepisaroiden kulkeutumista tutkittiin materiaalinäytteestä P61 eristettyä *Penicillium expansum* P61 -kannalla. Tavoitteena oli selvittää

- ilmatilavuuden vaikutus nestepisaratuottoon,
- nestepisaroiden sisältämien toksiinien kulkeutuminen suljetussa ilmatilassa sekä
- toksiinien siirtyminen rakennuspaperin läpi.

Pisaratuotto alkoi pienessä (0,035 l) ja suuressa (3,7 l) ilmatilassa samana päivänä, eikä pisaroiden määrässä tai koossa havaittu eroa viikon aikana (Kuva 37).

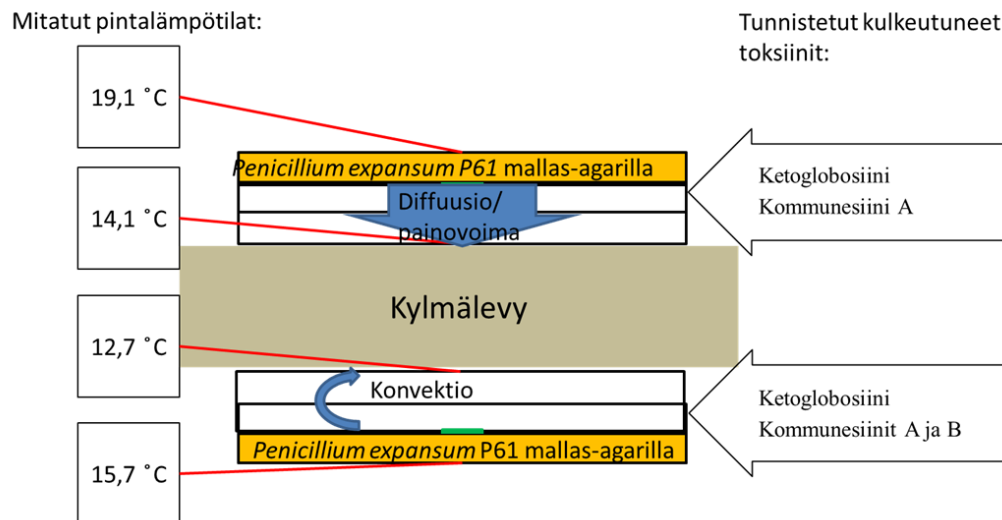


Kuva 37. *Penicillium expansum* P61 mallas-agar-maljoilla, ikä 6 vrk a) malja avoimena suljetussa lasipurkissa b) malja suljettuna c) malja suljettuna, säilytys ylösalaisin.

Nestepisaroiden sisältämien toksiinien kulkeutumisen mekanismeista tutkittiin aiheuttamalla muutaman asteen lämpötilaero kasvuston ja viljelymaljan kannen väliin (Kuva 38). Toksiinien siirtyminen konvektiolla tai diffuusiolla mitattiin toksiinien siirtymisenä ilman läpi kasvuston yläpuoliseen jäädytettyyn kanteen. Siihen kondensoitui nestettä 5 ml (Kuva 39), joka kerättiin ja analysoitiin (LC-MS/MS). Nesteestä löytyi ketoglobosiinia sekä kommunesiineja A ja B. Tämä osoitti

toksiinien kulkeutuneen vesihöyryn mukana suljetussa ilmatilassa. Vaikutusmekanismi oli joko konvektio tai diffuusio.

Toksiinien kulkeutumista ilman konvektiota mitattiin toksiinien siirtymistä kasvustosta sen alapuolella sijaitsevaan jäähdytettyyn kanteen. Kanteen kertyi pisaroita 5ml, jotka sisälsivät ketoglobosiinia ja kommunesiinia A. Nesteen kertyminen saattoi johtua diffuusiosta tai painovoimaisesta tippumisesta tai molemmista.



Kuva 38. *Penicillium expansum* P61 tuottamien toksiineja sisältävien nestepisaroiden kulkeutuminen ilmatilassa. Ketoglobosiini ja kommunesiinit A ja B siirtyivät yläpuoliseen jäähdytettyyn pintaan. Ketoglobosiini ja kommunesiini A siirtyivät ilmatilan läpi alapuolella sijaitsevaan jäähdytettyyn pintaan.

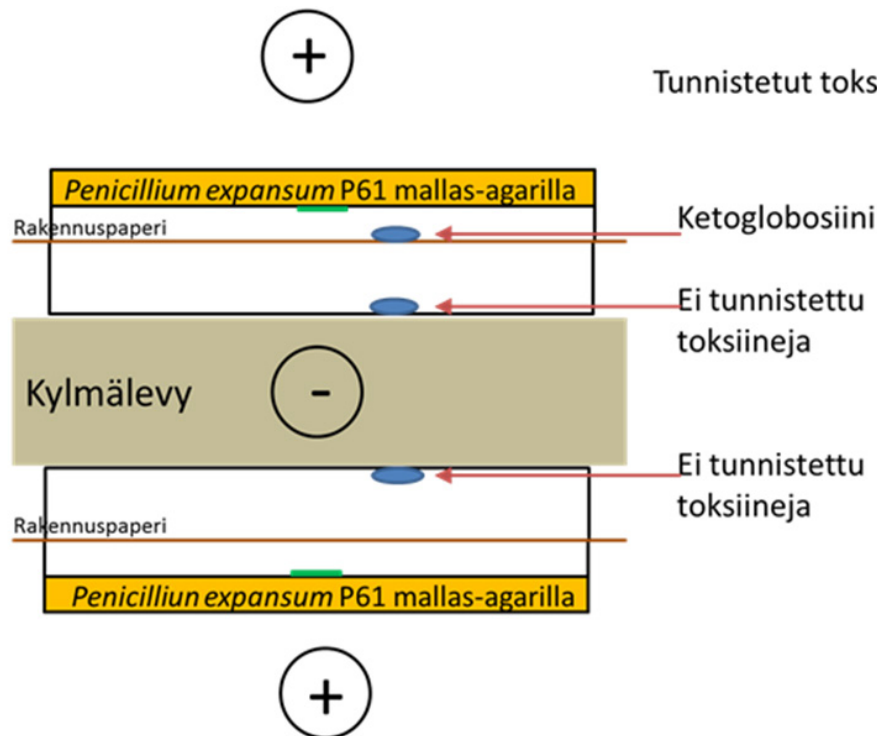


Kuva 39. Kasvatusmaljojen jäähdytettyyn kansiin kondensoituneet nestepisarot.

Toksiinien kulkeutumista rakennuspaperin läpi tutkittiin sijoittamalla rakennuspaperit kahden maljan ilmatilaan siten, ettei paperi koskettanut kasvustoa eikä maljan kantta (Kuva 40). Toisella maljalla tutkittiin nestepisaroiden kulkeutumista kasvustosta alaspäin ja toisella kasvustosta ylöspäin. Kulkeutuminen toteutettiin lämpötilaeroilla.

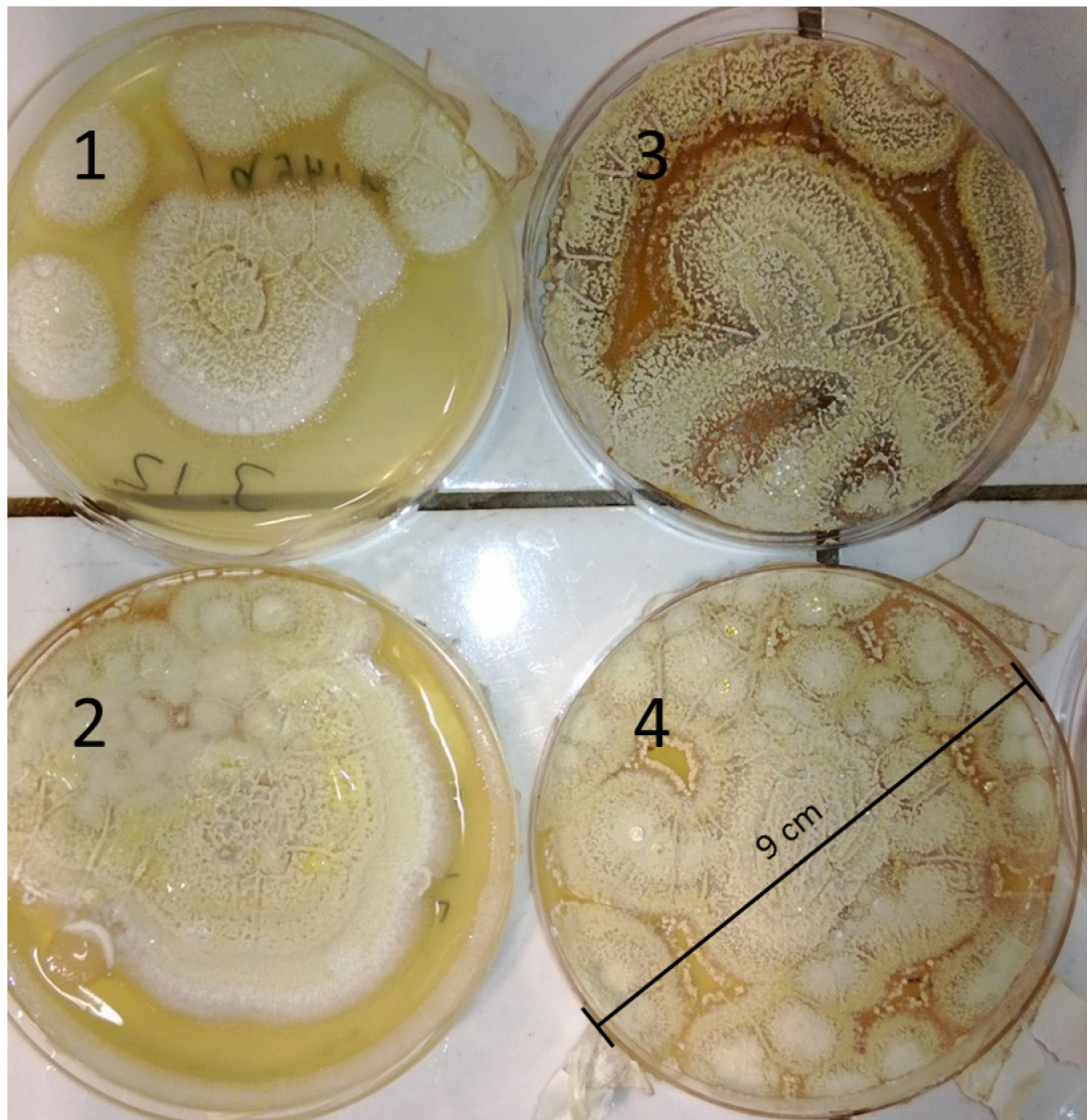
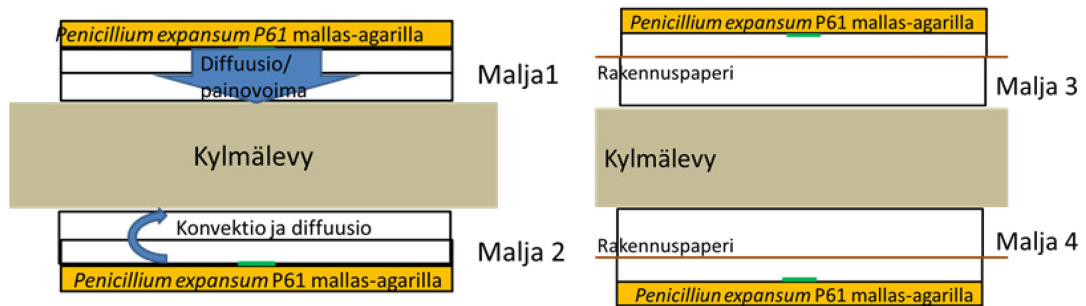
Kasvustosta alaspäin rakennuspaperin läpi kondensoitui nestettä 18 ml. LC-MS/MS -analyysissa siitä ei löydetty *Penicillium expansum* -homeen toksiineja. Siis vesihöyry läpäisi rakennuspaperin, mutta sen mukana ei kahden viikon aikana siirtynyt *P. expansumin* toksiineja. Sen sijaan paperin pintaan kondensoituneesta nesteestä löytyi ketoglobosiinia, jota *P. expansum* tuotti (Kuva 40).

Kasvustosta ylöspäin rakennuspaperin läpi kondensoitui nestettä 1 ml. Se analysoitiin (LC-MS/MS), mutta siitä ei löydetty *P. expansumin* toksiineja.



Kuva 40. Rakennuspaperi toksiiniemission estäjänä. *Penicillium expansum* P61 tuottamia nestepisaroita kulkeutui rakennuspaperin läpi, mutta neste ei sisältänyt *P. expansumin* toksiineja. Kasvustosta painovoimaisesti rakennuspaperin pintaan tippuneessa nestepisarassa tunnistettiin ketoglobosiini.

Tulokset osoittavat, että rakennuspaperi suljetussa ilmatilassa päästi veden läpi, mutta ei *P. expansumin* toksiineja. Mielenkiintoinen havainto oli, että rakennuspaperi aktivoi *P. expansumin* itiöinnin. Itiöinti näkyi kahvinruskeana ornamenttina jo kahden viikon kasvatuksen jälkeen maljassa jonka ilmatilassa oli rakennuspaperi (Kuva 41, malja 3). Muuten samanlainen malja, kasvatettu saman ajan samoissa olosuhteissa (malja 1) ei ollut tässä ajassa ehtinyt itiöidä lainkaan.



Kuva 41. Toksiinien kulkeutumiskokeissa olleet *Penicillium expansum* P61 kasvustot 2 viikon ikäisinä mallas-agar-kasvatusmaljoilla. Maljojen numerot osoittavat mistä kulkeutumiskokeen maljasta on kysymys. Oikealla olevissa maljoissa oli ilmatilassa rakennuspaperi. Maljanumero 3 on vahvasti itiöitynyt. Rihmakasvustot ovat sienillä yleensä vaaleina, tasavärisinä, eikä niitä ole mahdollista mikroskooppillakaan tunnistaa sukutasolle. Itöitynyt kasvusto on monivärinen (*P. expansum* kellertävästä kahvinruskeaan) ja muotorikkaus näkyy jo paljaalla silmällä. Maljan halkaisija on 9 cm.

5.2.6 Tulosten tarkastelu vesihöyrystä haitta-aineiden kuljettajana

Tulokset antoivat uutta merkittävää tietoa sisäilman epäpuhtauksien kulkeutumisesta vesihöyryn mukana. Tulokset todistivat, että sisäilman vesihöyryä kondensoimalla saatiin kerättyä vain muutamassa vuorokaudessa sisäilmasta näytteitä, joiden toksisuus saatiin mitattua. Tulokset todistivat myös, että eri huoneista kerätyt kondenssivedet erosivat sekä toksisuuden että väkevyyden suhteen. Verrokkeja muihin mittauksiin ei ole. Vielä ei tiedetä, mikä kerätyn veden toksisuuden aiheutti.

Kondensoitunut vesi ja keräysastian etanolihuuhtelun yhdistäminen olisi antanut vertailukelpoisemmat näytteet eri huoneista.

Otosmäärä oli pieni, vain neljä tutkittavaa huonetilaa, ja toisaalta kerätty näyte vastasi pientä ilmamäärää, noin 17–22 m³. Ilmamäärävastaavuus oli laskennallinen eikä mitattu. Eri tilojen toksisuuskuormia verrattiin keskenään oletuksella, että näyte vastasi laskettua ilmamäärää.

Kondenssikerääjässä käytettiin avointa keräysastiaa, mikä mahdollisti kerätyn veden haihtumisen astiasta ilmapirtojen sekä kosteusvaihteluiden vuoksi. Avoin keräysastia mahdollisti lisäksi hiukkasmaisten epäpuhtauksien sedimentaation suoraan sisäilmasta keräysastiaan eli välttämättä kaikki keräysastiasta saatu haihdutusjäännös ei ollut vesihöyryn kuljettamaa. Toisaalta kaikki keräysastiasta saadut epäpuhtaudet ovat olleet keräysaikana tutkittujen huoneiden sisäilmassa.

Kondenssikeräysjaksoilla kondenssiveden saanti riippui huoneilman vesihöyrypitoisuudesta. Kuitenkin keräysjaksoilla kondensoitunut vesimäärä vastasi suunnilleen samaa ilmamäärää kaikissa huoneissa, joissa vettä saatiin kerättyä. Keräysajankohtaa määrittäessä tulee huomioda ajankohdan ulkoilman kosteuspitoisuus. Esimerkiksi huoneen 145b huoneilman kosteuspitoisuus oli ajoittain alempi kuin kondenssikeräysastian pintalämpötilan kriittinen kosteuspitoisuus, jolloin astiasta on saattanut haihtua osa kerätystä nesteestä takaisin huoneilmaan. Tämän johdosta kerätyn veden suhteen arvioidussa ilmamäärässä saattoi olla suurikin ero todelliseen.

Kokeessa todettiin nesteen ja toksiinien kulkeutuminen ilmatilassa 1 cm matkan. Kulkeutumismatkoja sekä kosteuden vaikutusta kulkeutumiseen tulisi testata laboratorioissa muuttuvilla olosuhteilla. Kulkeutumismekanismi jäi epäselväksi.

Nestepisaroiden mukana kulkeutuneiden toksiinien tutkimisessa todettiin, ettei tutkittuja toksiineja löytynyt rakennuspaperin läpäisseeestä vedestä. Toksiinit olivat saattaneet imeytyä rakennuspaperiin tai kanta ei tuottanut rakennuspaperin vuoksi kommunesiinitoksiineja. Kahden viikon kasvatusaika oli lyhyt. Ei tiedetä, miten pidempi aika vaikuttaisi läpäisyyn.

5.3 Haihtuvat yhdisteet (VOC) sisäilman laadun indikaattorina

5.3.1 Kaasusensoreilla saadut tulokset

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuuksien ilmanvaihdon, painesuhteiden ja käyttökuorman aikariippuvuuden selvittämiseksi mitattiin jatkuvatoimisilla Figaro TGS -kaasusensoreilla (VOC1 ja VOC2) toimistohuoneen 335 sisäilmaa neljän viikon ajan alkaen 30.5.2013. Kaasusensoreilla mitatut arvot tallennettiin 2 minuutin välein. Tulokset ensimmäiseltä neljältä päivältä ovat kuvassa 42 ja viikoilta 23 ja 25 kuvassa kuvassa 43. Mittausjakson sensorivastuksen muutosten perusteella todettiin ilmanvaihdosta johtuva käyttäytymisero arkipäivien ja viikonloppujen välillä. Ilmanvaihdon todettiin olleen arkisin suljettuna klo 20.00–22.00 ja viikonloppuisin klo 7.30–22.00. Tällöin epäpuhtauspitoisuudet kasvoivat yleisen sekoitusytälön käyrän muotoisesti.

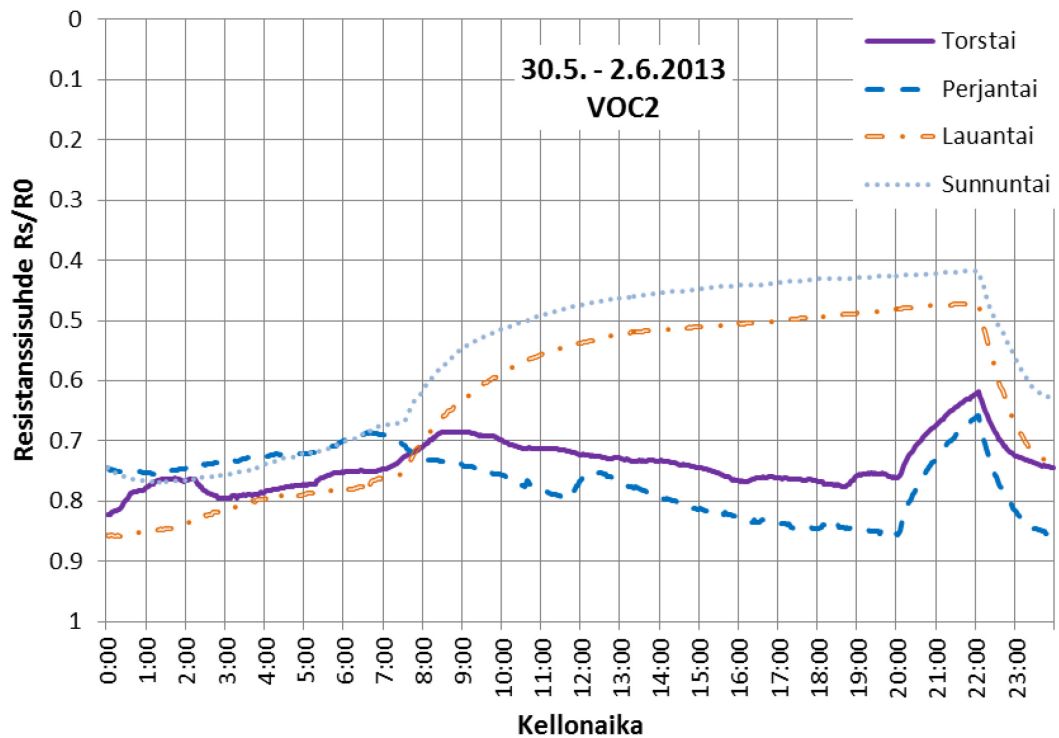
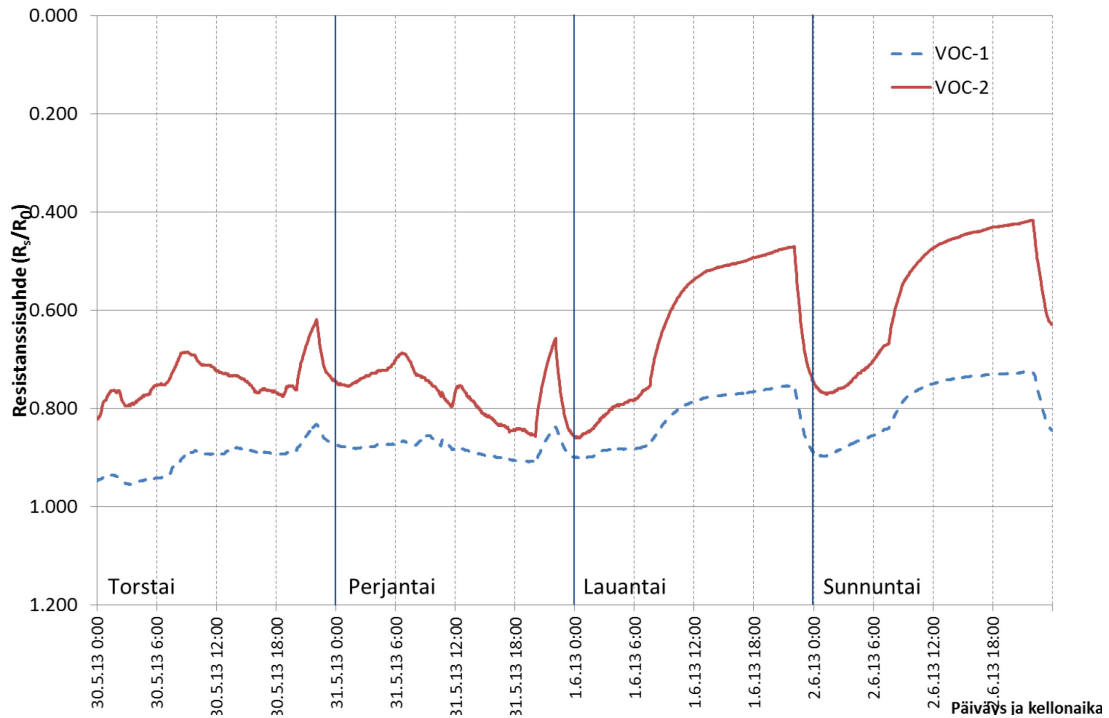
Mittaustuloksia verrattiin saman ajankohdan säädataan ja ulkoilman kosteuspitoisuuteen ja ilmanpaineeseen. Havaittiin, että ilmanvaihdon ollessa päällä, mittaustuloksien ajallinen vaihtelu noudatti käyttäytymiseltään ulkoilman kosteuspitoisuuden vaihtelua. Suhteellisen kosteuden vaikutus sensorin vastukseen ja mittaustuloksiin tarkastettiin laboratoriokokeella ja todettiin anturin vastusvaihtelun johtuneen sisäilman suhteellisesta kosteudesta.

5.3.2 Adsorbenttimenetelmä sisäilman VOC-indikaattorina

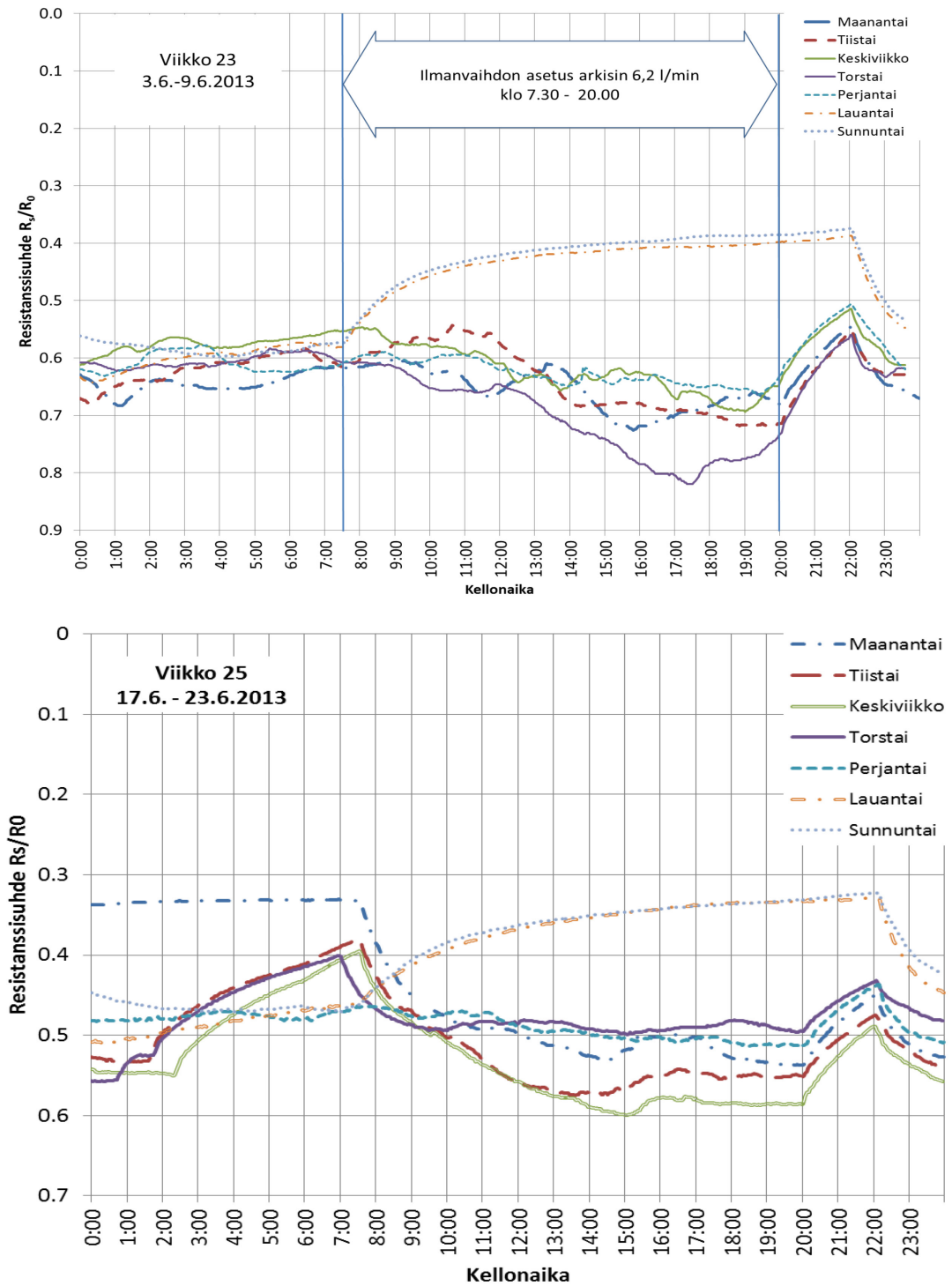
Huoneen 335 haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kvantitoimiseksi ja analysoimiseksi (GC-MS) eri tilanteissa otettiin ensimmäisten päivien mittaustulosten kaasusensoreilla mitatun ajasta riippuvan käyttäytymisprofiilin (Kuva 42) perusteella ilmanäytteitä Tenax-adsorbenttiin. Adsorbenttinäytteiden ottoajankohdiksi valittiin yksi arkipäivä, jolloin ilmanvaihto oli ollut jatkuvatoimisesti päällä yli 12 tuntia, lauantai-ilta klo 20.00, jolloin ilmanvaihto oli ollut pois päältä yli 12 tuntia ja sunnuntaiyö klo 0.15, kun ilmanvaihto oli käynnistynyt noin kaksi tuntia aikaisemmin (Kuva 44).

Näytteenottoajankohdalla on merkitystä ja tilan ilmanvaihtoprofiili on tunnettava tulosten tulkitsemiseksi.

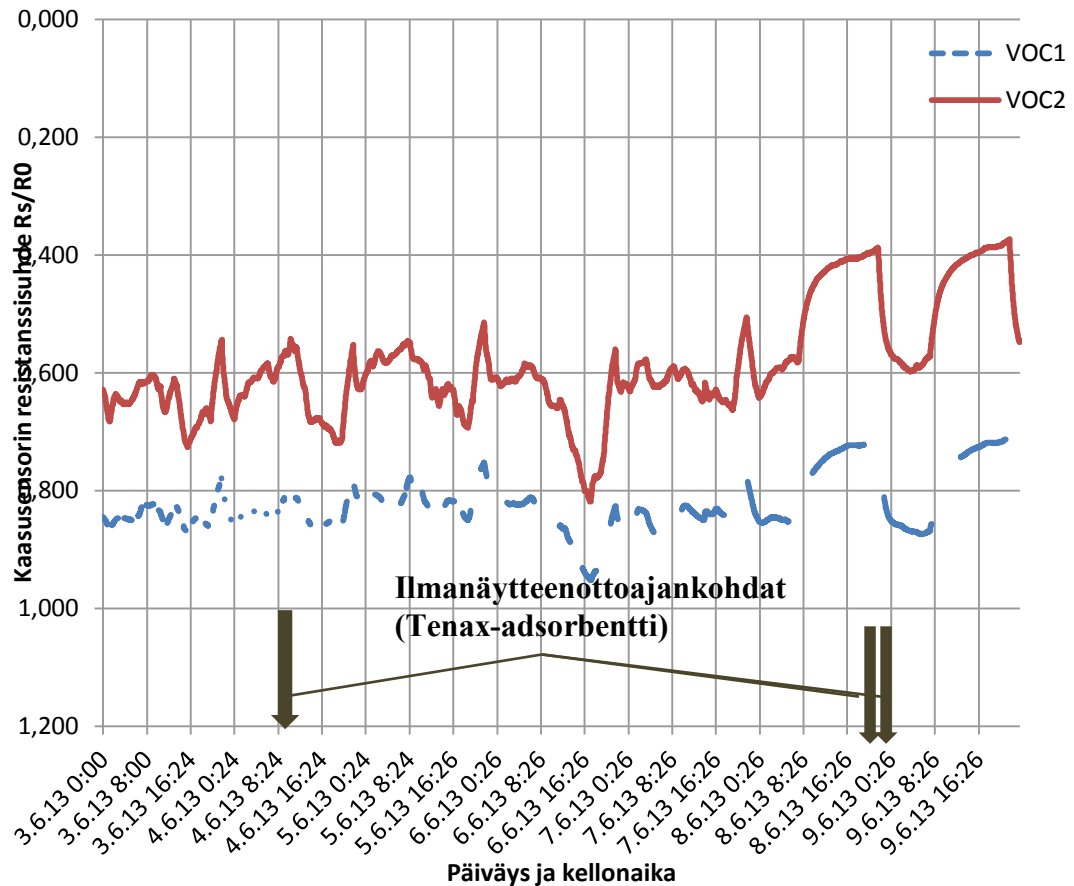
Erittäin haihtuvat yhdisteet (VVOC, retentioaika 0-1,2 min.) eivät erottuneet toisistaan kaasukromatografisessa analyysissä ja ne kvantitoitiin yhdessä. VVOC-pitoisuudet adsorbenttinäytteissä olivat 289–293 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Taulukko 19). Kokonaispitoisuudet (TVOC) olivat 360–566 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Yhdisteiden, joiden retentioajat olivat 1,2–27 min, VOC-pitoisuudet olivat 70–273 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Näistä yhdisteistä tunnistettiin ja kvantitoitiin 50–71 %. Tunnistetut yhdisteet ovat taulukossa 20. Kromatogrammit ovat liitteessä B.



Kuva 42. Kaasusensorien mittausdata 30.5–2.6.2013. Ylemmässä kuvassa jatkuvan mittauksen käyrä VOC1- ja VOC2 -sensoreilla mitattuna koko mittausjaksolta. Alemmassa kuvassa VOC2-sensorilla mitattu vuorokausittainen käyttäytyminen. R_s on kaasusensorin vastus kyseisellä mittaushetkellä ja R_0 on kaasusensorin vastus puhtaassa ilmassa. Resistanssisuhde R_s/R_0 on 1, kun mitattavassa tilassa ei ole yhdisteitä, jolle sensori reagoi.



Kuva 43. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ajallinen vaihtelu huoneen 335 sisäilmassa vuorokaudenaikojen mukaan kahdelta viikon mittausjaksolta. Kuva a) mittausajalta 3.6.- 9.6.2013, b) mittausajalta 17.6. - 23.6.2013. Mittauksessa VOC2 (TGS 2602) -sensori, joka reagoi ilman vetykaasuihin, ammoniakkiin, vetysulfidiin, etanoliin ja tolueeniin. R_s on kaasusensorin vastus kyseisellä mittaushetkellä ja R_0 on kaasusensorin vastus puhtaassa ilmassa.



Kuva 44. Tenax-adsorbenttinäytteiden ottoajankohdat ja mittaustulokset kaasusensorien resistanssisuhteet 3.6. - 9.6.2013 toimistohuoneessa 335. Adsorbenttinäytteiden ottoajankohdat on merkitty alaspäin suuntautuvilla nuolilla. VOC1-sensori (TGS 2600) mittaa metaania, hiilimonoksidia, isobutaania, etanolia sekä vetyä ja VOC2-sensori (TGS 2602) ammoniakkia, vetyä, etanolia, tolueenia sekä rikkivetyä. R_s on kaasusensorin vastus mittaushetkellä ja R_0 puhtaassa ilmassa.

Taulukko 19. VOC-pitoisuudet [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] 4.6., 8.6. ja 9.6.2013 työhuoneesta 335 otetuissa adsorbentti-ilmanäytteissä. TVOC on haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus näytteessä, VVOC on erittäin helposti haihtuvat orgaaniset yhdisteet (very volatile organic compounds).

Tenax-adsorbenttinäyte	AA0	BB3	AA3
Näytteen tilavuus [l]	8,4	5,0	4,7
Näytteenottoaika	ti 4.6.2013 klo 10.28	la 8.6.2013 klo 20.00	su 9.6.2013 klo 0.15
TVOC [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	360	566	391
VVOC (1–1,2 min) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	289	293	293
VOC (1,2–27 min) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	70	273	98
Tunnistettu ja kvantitoitu [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	35	169	70
Tunnistettu ja kvantitoitu [%]	50	62	71

Taulukko 20. Identifioidut VOC-yhdisteet ja niiden pitoisuudet retentioaikajärjestyksessä huoneen 335 ilmanäytemittauksissa 4.6.2013 (näyte AA0), 8.6.2013 (näyte BB3) ja 9.6.2013 (näyte AA3). Mahdolliset MVOC:t on merkitty taulukkoon vihreällä.

CAS	Yhdiste	Näyte		
		AAO	BB3	AA3
		ti 4.6.2013 klo 10.28	la 8.6.2013 klo 20.00	su 9.6.2013 klo 0.15
		8,4 l	5,0 l	4,7 l
		[µg/m³]	[µg/m³]	[µg/m³]
67-64-1	Asetoni	4,3	1,6	4,5
62-55-5	Trimetyylisilanol		15,3	6,7
64-19-7	Etikkahappo			1,4
123-72-8	Butanaali		2	
78-93-3	2-butanoni	1,3		
71-36-3	1-butanoli	1,7	7,3	2,3
110-62-3	Pentanaali		4,2	
107-87-9	2-pentanoni			1,2
142-82-5	Heptaani	1,1		
290-37-9	Pyratsiini			1,2
108-87-2	Metyylisykloheksaani	0,9		
108-88-3	Tolueeni	1,7	3,8	1,9
71-41-0	1-pentanol		3,6	1,5
591-78-6	2-heksanoni		1,7	1,1
141-79-7	4-metyyli-3-penteeni-2-oni		1,9	1,3
66-25-1	Heksanaali	1,1	8,5	2,3
123-86-4	Butyyliasetaatti	0,9	2	1,1
55012-80-1	Heksametyyli-syklotrisiloksaani	0,9	3,2	1,8
111-84-2	Nonaani	0,9	2,1	1,2
98-01-1	Furfuraali		1,8	1,2
123-42-2	4-hydroksi-4-metyyli-2-pentanoni	1	1,7	1,2
100-41-4	Etylibentseeni	1	2,4	1,3
95-47-6 /106-42-3	O/P-ksyleeni	2,2	3,6	1,6
106-35-4	3-heptanoni		1,7	
109-52-4	Propyyliasetaatti		2,1	
111-71-7	Heptanaali		2,1	1,2
111-76-2	2-butoksietanol		2,1	
98-82-8	1-metyylietylibentseeni		1,6	1,1
80-56-8	α-pineeni	1,7	14,9	2,9
5131-66-8	1-butoksi-2-propanoli		1,7	
79-92-5	Kamfeeni		1,7	1,1
103-65-1	Propyylibentseeni	0,8	1,7	1,1

611-14-3	1-etyyli-2-metyylibentseeni	0,8		
100-52-7	Bentsaldehydi		3,8	2,1
108-83-8	2,6-dimetyyli-4-heptanoni		2	1,2
18172-67-3	β -pineeni	0,8	2,1	1,2
59128-97-1	Heptaani, 2,2,4,6,6-pentametyyli	0,8		
110-93-0	6-metyyli-5-hepteeni-2-oni		2,1	1,2
95-63-6	1,2,4-trimetyylibentseeni	0,8	1,8	
108-67-8	1,3,5-trimetyylibentseeni		1,9	1,2
142-62-1	Heksaanihappo		4,3	
124-18-5	Dekaani	0,9	1,9	1,2
124-13-0	Oktanaali		3,4	1,4
13466-78-9	3-kareeni	0,8	1,9	1,2
138-86-3	Limoneeni	0,8	2,1	1,2
104-76-7	2-etyyli-1-heksanoli		3,5	1,6
122-78-1	Bentseeniasetaldehydi		1,6	
98-86-2	Asetofenoni		2,2	1,4
111-87-5	1-oktanoli		1,7	
1120-21-4	Undekaani	0,8	2	1,2
124-19-6	Nonanaali	0,8	5,3	1,8
78-40-0	Trietyylifosfaatti		1,7	
124-07-2	Kapryylihappo		1,9	
112-40-3	Dodekaani	0,8	1,7	
112-31-2	Dekanaali		5,4	1,7
629-50-5	Tridekaani	0,8	1,7	1,1
112-44-7	Undekanaali		1,7	
102-76-1	Triasetiini	1,7		3,7
25395-31-7	Diasetaatti-1,2,3-propaanitrioli		7,5	
629-59-4	Tetradekaani	0,8	1,7	1,2
112-54-9	Dodekanaali		1,7	
629-62-9	Pentadekaani	0,8	1,8	1,2
544-76-3	Heksadekaani	0,9	2	1,3
Identifioidut yhdisteet yhteensä		34,6	168,7	70,3

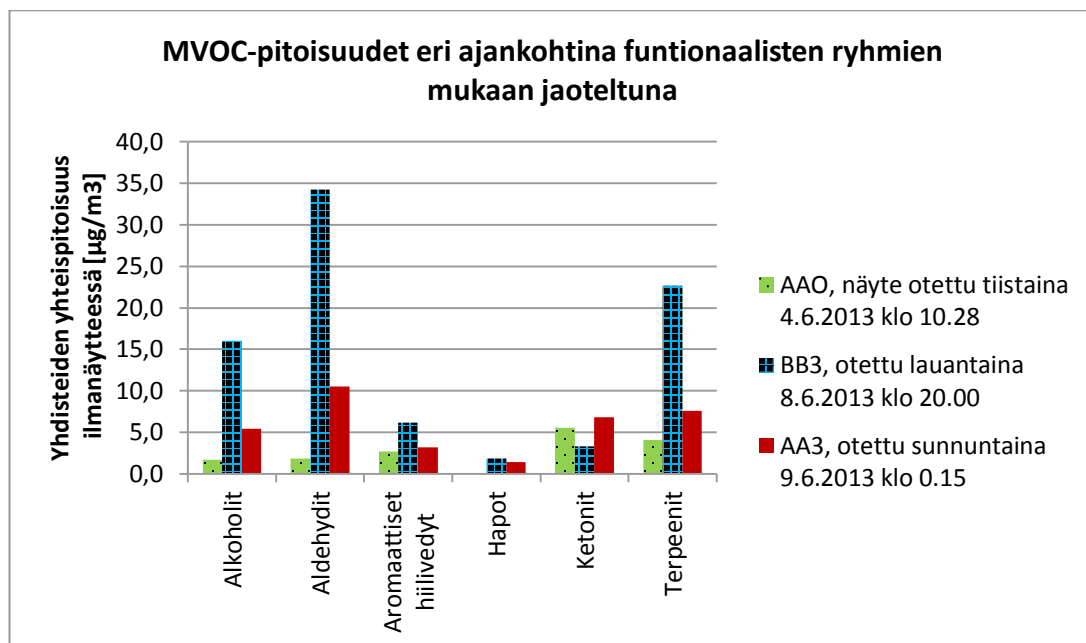
Toimistohuoneen 335 ilmanäytteistä tunnistettiin mahdollisia mikrobiperäisiä alkoholeja, aldehydejä, aromaattisia hiilivetyjä, happoja, ketoneita sekä terpeenejä.

MVOC-pitoisuuksissa oli eroja kaasusensorimittausten epäpuhtauspitoisuusprofiilin perusteella valituissa ajankohdissa (Taulukko 11).

Mitatut alkoholiryhmän yhteispitoisuus kymmenkertaistui, aldehydiryhmän 17-kertaistui, terpeeniryhmän viisinkertaistui ja ketoniryhmän yhteispitoisuus puolittui, kun ilmanvaihto oli ollut yli 12 tuntia pois päältä (näyte BB3) verrattuna arkipäivänä mitattuihin pitoisuuksiin (näyte AA0) (Kuva 45). Korkeimmillaan aldehydien yhteispitoisuus oli 36,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (näyte BB3). Eri yhdisteiden pitoisuusprofiilit erosivat

toisistaan (Kuva 46). Kevyiden yhdisteiden (VVOC) pitoisuus oli kaikissa näytteissä lähes sama, 289–293 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Tuloksien perusteella eri yhdisteillä ja yhdisteryhmillä on erilaiset ajasta riippuvat käyttäytymisprofiilit.

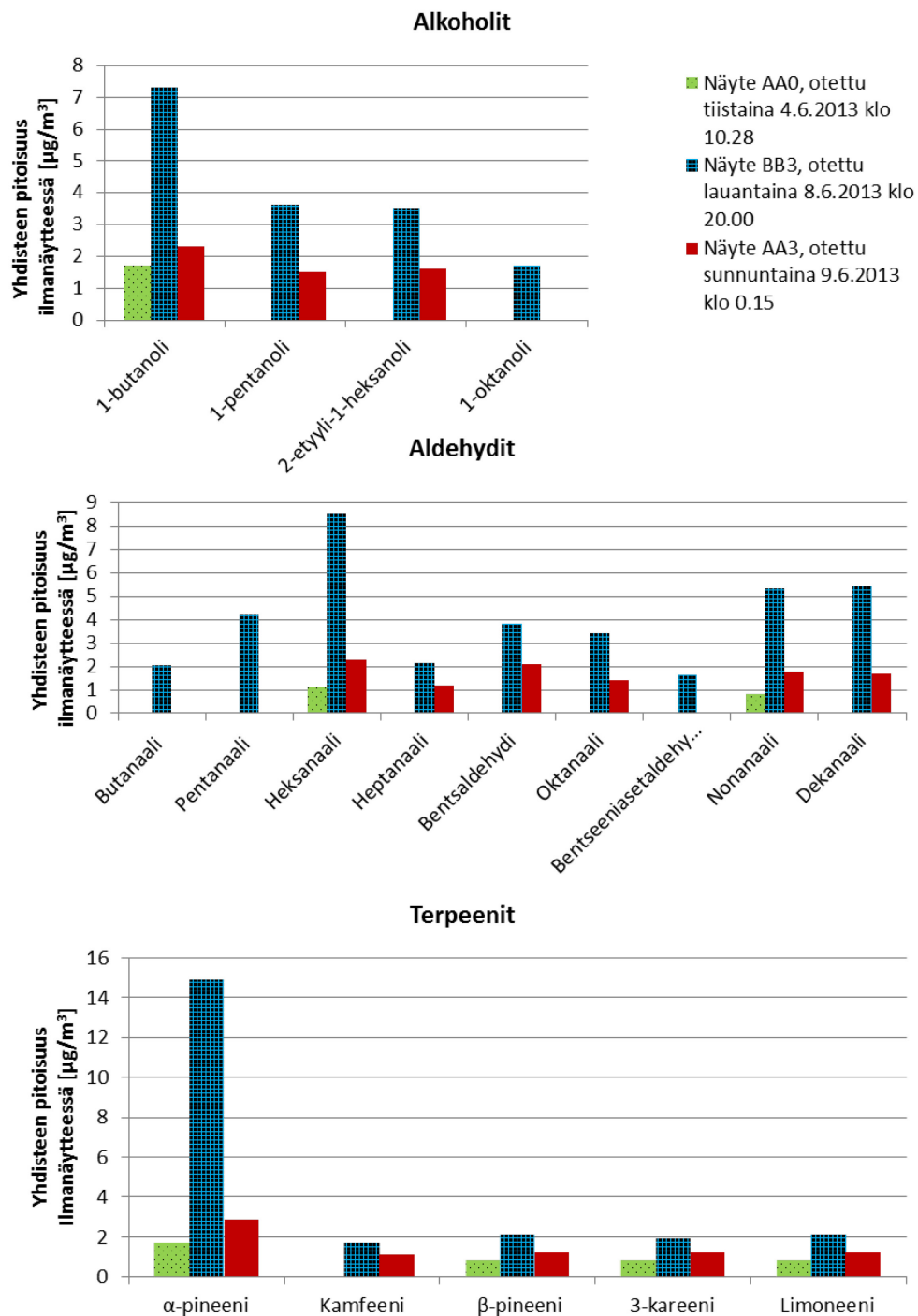
α -pineenin pitoisuus toimistohuoneen 335 sisäilmassa oli tunnistetuista mahdollisista MVOC-yhdisteistä korkein, 14,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Kaikista tunnistetuista yhdisteistä korkein pitoisuus huoneen sisäilmassa oli trimetyylisilanolilla, 15,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



Kuva 45. MVOC-pitoisuudet eri ajankohtina funktionaalisten ryhmien mukaan jaoteltuna.

Taulukko 21. Huoneen 335 sisäilmasta tunnistetut mahdolliset mikrobiperäiset haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja pitoisuudet [$\mu\text{g}/\text{m}^3$] kolmen eri ajankohdan sisäilmanäytteissä funktionaalisten ryhmien mukaan jaoteltuna.

CAS-numero	Yhdiste	AAO [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	BB3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	AA3 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Alkoholit				
71-36-3	1-butanoli	1,7	7,3	2,3
71-41-0	1-pentanoli		3,6	1,5
104-76-7	2-etyyli-1-heksanoli		3,5	1,6
111-87-5	1-oktanoli		1,7	
	yhteensä	1,7	16,1	5,4
Aldehydit				
123-72-8	Butanaali		2	
110-62-3	Pentanaali		4,2	
66-25-1	Heksanaali	1,1	8,5	2,3
111-71-7	Heptanaali		2,1	1,2
100-52-7	Bentsaldehydi		3,8	2,1
124-13-0	Oktanaali		3,4	1,4
122-78-1	Bentseeniasetaldehydi		1,6	
124-19-6	Nonanaali	0,8	5,3	1,8
112-31-2	Dekanaali		5,4	1,7
	yhteensä	1,9	34,3	10,5
Aromaattiset hiilivedyt				
108-88-3	Tolueeni	1,7	1,9	1,9
100-41-4	Etyylibentseeni	1	1,3	1,3
	yhteensä	2,7	3,8	3,2
Hapot				
64-19-7	Etikkahappo			1,4
124-07-2	Kapryylihapo		1,9	
	yhteensä	0	1,9	1,4
Ketonit				
67-64-1	Asetoni	4,3	1,6	4,5
78-93-3	2-butanoni	1,3		
107-87-9	2-pentanoni			1,2
591-78-6	2-hexanoni		1,7	1,1
	yhteensä	5,6	3,3	6,8
Terpeenit				
80-56-8	α -pineeni	1,7	14,9	2,9
79-92-5	Kamfeeni	0	1,7	1,1
18172-67-3	β -pineeni	0,8	2,1	1,2
13466-78-9	3-kareeni	0,8	1,9	1,2
138-86-3	Limoneeni	0,8	2,1	1,2
	yhteensä	4,1	22,7	7,6



Kuva 46. Tunnistettujen alkoholien, aldehydien sekä terpeenien pitoisuudet [µg/m³] toimistohuoneen 335 sisäilmanäytteissä. Näytteet otettiin Tenax-adsorbentteihin tiistaina 4.6.2013 työpäivän aikana, lauantaina 8.6.2013 klo 20.00, kun ilmanvaihto oli ollut suljettuna 12 tuntia, ja sunnuntaina 9.6.2013 klo 0.15, kun ilmanvaihto oli käynnistynyt kaksi tuntia aiemmin.

5.3.3 Tulosten tarkastelu VOC-mittauksista

Tulokset osoittavat ilmanäytteiden ottamisen ajankohdan merkityksen. On tunnettava tilan käyttäytyminen ainakin ilmanvaihdon suhteen, jotta voidaan tulkita tuloksia. Ajasta riippuvan mittauksen tuloksissa näkyi toimistoympäristön ilmanvaihtoasetusten mukainen viikkosykli. VOC-sensorien mittaustuloksista ei kuitenkaan ollut mahdollista saada huoneilman epäpuhtauspitoisuuksia [ppm], koska sensorit mittasivat useita eri kaasuja. Lisäksi sensorien herkkyys eri kaasujen pitoisuuksille vaihteli.

Adsorbenttinäytteissä todettiin samansuuntainen ajallinen vaihtelu kuin VOC-sensoreilla. Adsorbenttinäytteet olivat kertamittauksia. Luotettavuutta olisi lisännyt vähintään kahden samanaikaisesti otetun näytteen analyysit. Lisäksi on huomattava, ettei kaikkia yhdisteitä tunnistettu. Kokonaispitoisuuksien (TVOC) tai mikrobipohjaisten yhdisteiden (MVOC) pitoisuuksien ajallisen vaihtelun seurantaa varten olisi pitänyt ottaa useampia adsorbenttinäytteitä tai valita sensoreita, jotka mittaavat tiettyjä yhdisteitä. ”Sormenjälki”-profiilin luomiseksi ajasta riippuvilla mittauksilla tarvitaan antureita koko haihtuvien yhdisteiden skaalalla kevyemmistä raskaampiin.

VOC-sensorien resistanssisuhteen aikariippuvan vaihtelun havaittiin noudattavan ulkoilman kosteuspitoisuuden vaihtelua ilmanvaihdon päälläoloaikoina. Sisäilman kosteuspitoisuuden oletettiin vastaavan ulkoilman kosteuspitoisuutta, koska ilmanvaihto oli päällä eikä tilassa ollut muuta kosteustuottoa. Suhteellisen kosteuden vaikutus VOC-sensorin jännitteenmuutokseen mitattiin kammiokokeella. Havaittiin, että ilmanvaihdon päällä ollessa anturin reagointi johtui tilan suhteellisesta kosteudesta ja ilmanvaihto huuhteli sensorin mittausalueen epäpuhtaudet tilasta. Tarkastelussa oli oletuksina sisätilassa ulkoilman kosteuspitoisuus ja lämpötila 21 °C.

Lämpötilamuutosten vaikutusta VOC-sensorien mittaustuloksiin ei tarkasteltu, vaan lämpötilan sisätilassa oletettiin pysyvän tasaisena. Anturit sijaitsivat paikassa, johon ei paistanut suoraan aurinko. Ulkolämpötila ei kohonnut koko mittausajanjaksolla yli 20 °C, maksimi oli 18,4 °C. Valmistajan tietojen mukaan sensorit reagoivat lämpötilamuutoksiin, joten mahdolliset muutokset olisivat vaikuttaneet mittaustuloksiin.

Paine-erojen vaikutuksia tilan VOC-emissioihin ei pystytty tarkastelemaan, koska paine-eroa ympäröiviin tiloihin ja ulkoilmaan ei mitattu. Jatkotutkimuksissa tulisi samasta mittauspisteestä mitata lämpötila ja suhteellinen kosteus sekä paine-erot ympäröiviin tiloihin ja ulkoilmaan. Hiilidioksidipitoisuus tulisi myös mitata samalta ajalta, kun mitataan VOC-pitoisuuksien vaihtelua. Hiilidioksidipitoisuuden avulla on mahdollista saada tietoa tilan käytöstä sekä ilmanvaihtuvuudesta.

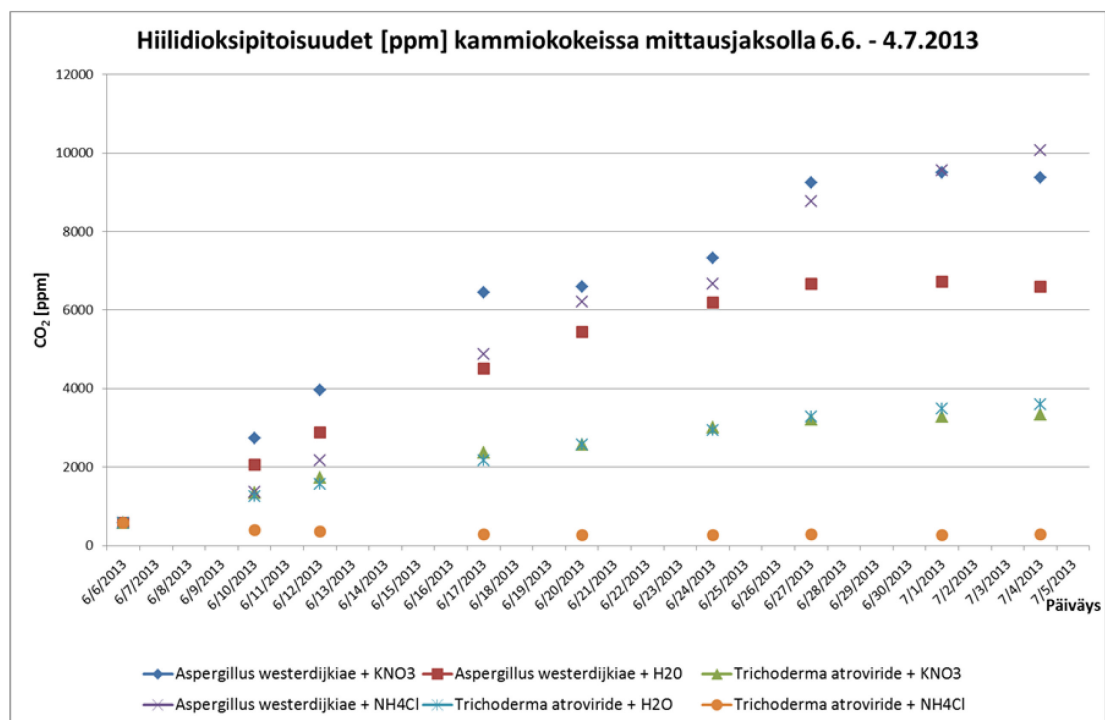
Käytetyillä VOC-sensoreilla oli taipumus ”ryömintään” pitkäaikaismittauksissa. Lisäluotettavuuden saamiseksi käytetyt anturit tulisi kalibroida melko usein.

5.4 Hiilidioksidi rakennuksen mikrobitoiminnan indikaattorina

5.4.1 Kammiokokeet indikaattorihomeilla

Kammiokokeilla selvitettiin mikrobien hiilidioksidituottoa kipsilevyllä ja hiilidioksidipitoisuustasoa suljetussa tilassa. Verrattiin kahden eri toksiinia tuottavan homelajin hiilidioksidituottoa eri typen lähteillä. Kammiokokeeseen valittiin sisäilmaongelmaisten rakennusten sisäilmasta eristetyt *Aspergillus westerdijkiae* PP2 sekä *Trichoderma atroviride* 1/226. Kasvualustoina olivat kipsilevyt, jotka oli kostutettu ammoniumkloridilla (NH_4Cl), kaliumnitraatilla (KNO_3) tai pelkällä vedellä (H_2O). Koekammioiden hiilidioksidipitoisuuksia mitattiin kahdesti viikossa neljän viikon ajan. Kuuden viikon kasvatuksen jälkeen kammiot huuhdeltiin puhdistetulla ulkoilmalla siten, että kammioiden hiilidioksidipitoisuudet vastasivat ulkoilmatasoa. Tämän jälkeen hiilidioksidipitoisuuksia mitattiin vielä kahden kuukauden ajan.

Neljän ensimmäisen viikon aikana mitatut hiilidioksidipitoisuudet koekammioissa ovat kuvassa 47.



Kuva 47. Koekammioiden hiilidioksidipitoisuudet [ppm] kammiokokeissa neljän ensimmäisen viikon aikana. Laboratoriokoekammioissa kasvatettiin *Aspergillus westerdijkiae* PP2 ja *Trichoderma atroviride* 1/226 -kantoja kipsilevyalustoilla (RH 96–98 %, huonelämpötila). Kipsilevyalustat oli kostutettu joko ammoniumkloridiliuoksella (NH_4Cl), kaliumnitraattiliuoksella (KNO_3) tai vedellä (H_2O).

Hiilidioksidipitoisuus suljetuissa kammioissa oli korkeimmillaan 10060 ppm. Hiilidioksidituottoon vaikuttivat laji alustan kostutus ja kasvun vaihe. *Aspergillus westerdijikiae* PP2 -kannan hiilidioksidituotto oli suurempaa kuin *Trichoderma atroviride* 1/226 -kannan.

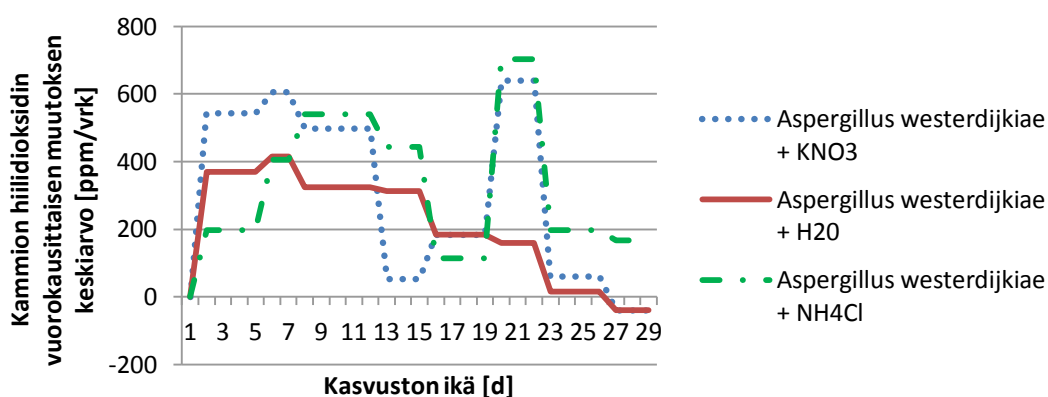
Aspergillus westerdijikiae PP2 lähti kasvamaan kaikilla kolmella kostutuslisällä. Suurin hiilidioksidituotto neljän ensimmäisen vuorokauden aikana oli alustalla, jossa kostutuslisänä käytettiin kaliumnitraattia (KNO_3) ja pienin hiilidioksidituotto alustalla, jossa oli kostutuslisänä ammoniumkloridi (NH_4Cl). Kaikilla kolmella kostutuslisällä hiilidioksidituotto oli yli 100 ppm vuorokaudessa siihen asti, että kammion hiilidioksidipitoisuus oli noin 6500 ppm. Keskimääräiset vuorokausittaiset hiilidioksidituoton muutokset ovat kuvissa 48 ja 49.

Neljän viikon kasvatuksen jälkeen kammioiden hiilidioksidipitoisuudet olivat ammoniumkloridilisällä 10060 ppm, kaliumnitraattilisällä 9490 ppm ja pelkällä vedellä 6720 ppm.

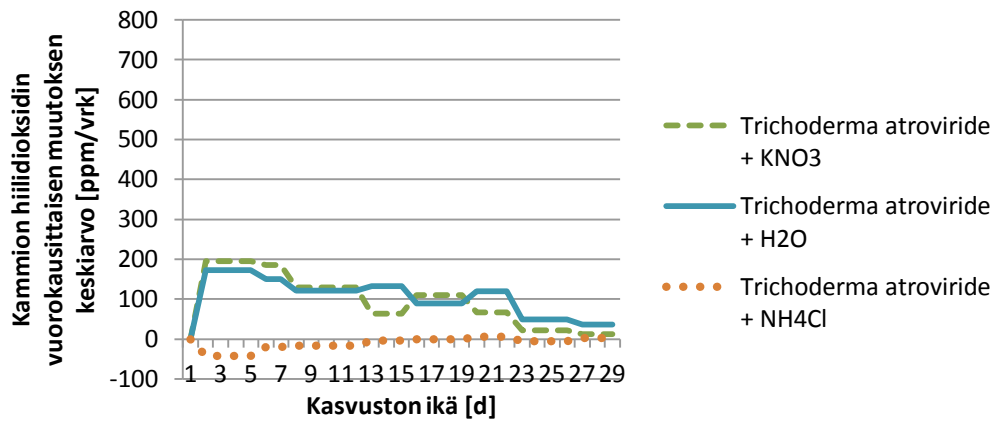
Trichoderma atroviride 1/226 lähti kasvamaan kipsilevyillä, jotka olivat kostutetut pelkällä vedellä tai kaliumnitraatilla ja kasvu oli mittaritarkkuuden rajoissa lähes identtistä koko neljän viikon tarkkailujakson ajan. Hiilidioksidipitoisuus kammiossa oli suurimmillaan 3600 ppm. Ammoniumkloridilla kostutetulla kipsilevyllä *Trichoderma atroviride* 1/226 ei kasvanut ollenkaan ja hiilidioksidipitoisuus laski kahdessa viikossa pitoisuuteen 270 ppm.

Yhteenveto kammiokokeen hiilidioksidipitoisuuksien [ppm] maksimiarvoista ja kammioiden hiilidioksidin määrästä [mg] sekä maksimimuutoksista [ppm/d] vuorokausittaisessa hiilidioksidipitoisuudessa on taulukossa 22.

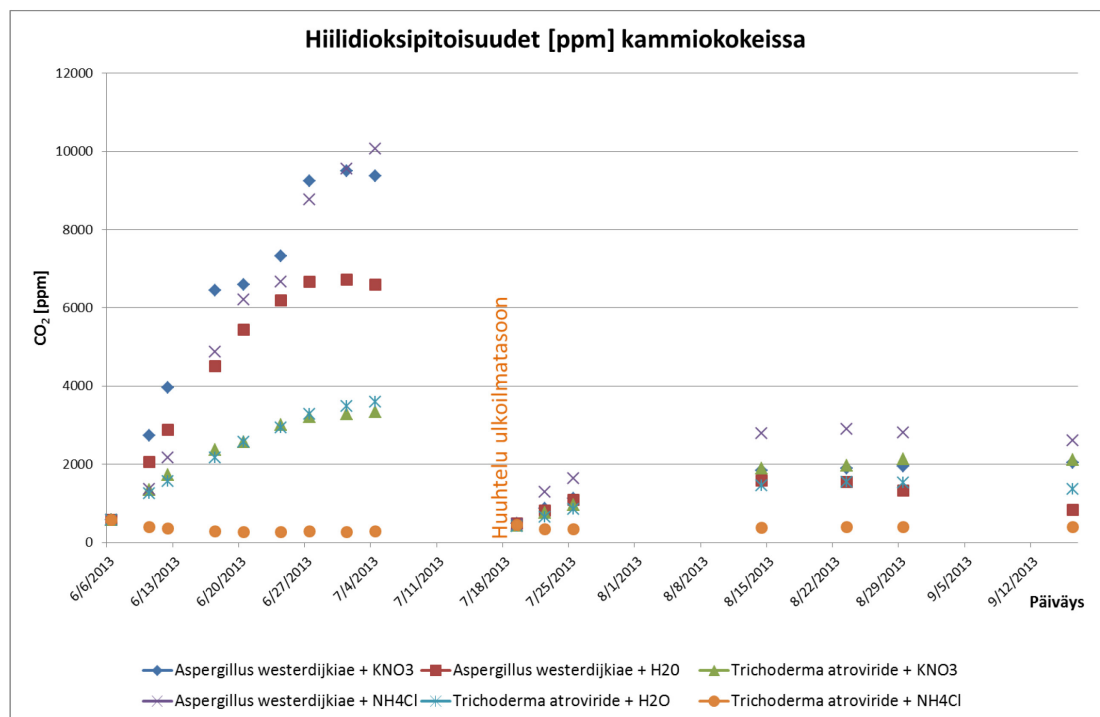
Kammioiden huuhtelun jälkeen hiilidioksidipitoisuudet eivät nousseet yhtä korkeiksi kuin ennen huuhtelua. Kuvaaja kammioiden hiilidioksidipitoisuuksista ajan funktiona on kuvassa 50.



Kuva 48. Kammiossa mitatun hiilidioksidipitoisuuden keskimääräinen vuorokausimuutos [ppm/vrk] mittauskertojen välisellä ajanjaksolla. Kammioissa *Aspergillus westerdijikiae* PP2 eri kostutuslisillä kipsilevyalustalla.



Kuva 49. Kammiossa mitatun hiilidioksidipitoisuuden keskimääräinen vuorokausimuutos [ppm/vrk] mittauskertojen välisellä ajanjaksolla. Kammioissa Trichoderma atroviride 1/226 kipsilevyalustoilla eri kostutuslisillä..



Kuva 50. Kammioden hiilidioksidipitoisuudet [ppm] ajan funktiona laboratoriokokeessa, jossa kipsilevyillä kasvatettiin Aspergillus westerdijikiae PP2 ja Trichoderma atroviride 1/226 -kantoja. Kipsilevyalustat oli kostutettu joko ammoniumkloridiliuoksella (NH_3Cl), kaliumnitraattiliuoksella (KNO_3) tai vedellä (H_2O).

Taulukko 22. Kammiokokeen hiilidioksidipitoisuuksien maksimi- ja keskimäärät [ppm] ja hiilidioksidin määrä [mg] koekammiossa sekä maksimimuutokset/vuorokausi mitatuissa hiilidioksidipitoisuuksissa [ppm/d] sekä maksimimuutos tunnissa alustan alaan nähden [$\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$]. Maksimimuutokset ovat keskiarvoja niiden mittausten jaksolta, joissa suurin vuorokausittainen pitoisuusero mittausten välissä. Koekammion tilavuus oli 12,5 l ja kipsilevykappaleen ala 100 cm².

Alusta		Maksimimuutos mittauskertojen välissä			Mitattu maksimi- ja keskimäärä kammiossa		
Kanta	Kostutus	[ppm/d]	[$\mu\text{g}/\text{cm}^2\text{h}$]	Missä iässä [d]	[ppm]	[mg]	Missä iässä [d]
<i>Aspergillus westerdijiae</i> PP2	H ₂ O	415	3,9	5–6	6720	153	25
<i>Aspergillus westerdijiae</i> PP2	NH ₄ Cl	703	6,7	19–21	10060	230	28
<i>Aspergillus westerdijiae</i> PP2	KNO ₃	640	6,1	19–21	9490	217	25
<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226	H ₂ O	173	1,6	1–4	3600	82	28
<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226	NH ₄ Cl	-42,5	-0,4	1–4	570 (alin 270)	6	0 14->
<i>Trichoderma atroviride</i> 1/226	KNO ₃	195	1,85	1–4	3330	76	28

5.4.2 Rakenteiden hiilidioksidipitoisuus mikrobitoiminnan indikaattorina

Toimistohuoneen 145b sisäseinän liikuntasauaman raosta mitattiin ohuella neulalla kokeellisesti rakenteen hiilidioksidipitoisuuksia ja verrattiin huoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuuteen. Tarkoituksena oli selvittää, löydetäänkö rakenteen sisältä huoneilmaa korkeampia hiilidioksidipitoisuuksia. Liikuntasauaman ympäristöstä oli toisessa kokeessa todettu kontaktialjoille pesäkkeitä muodostavia *Penicillium expansum* -itiöitä.

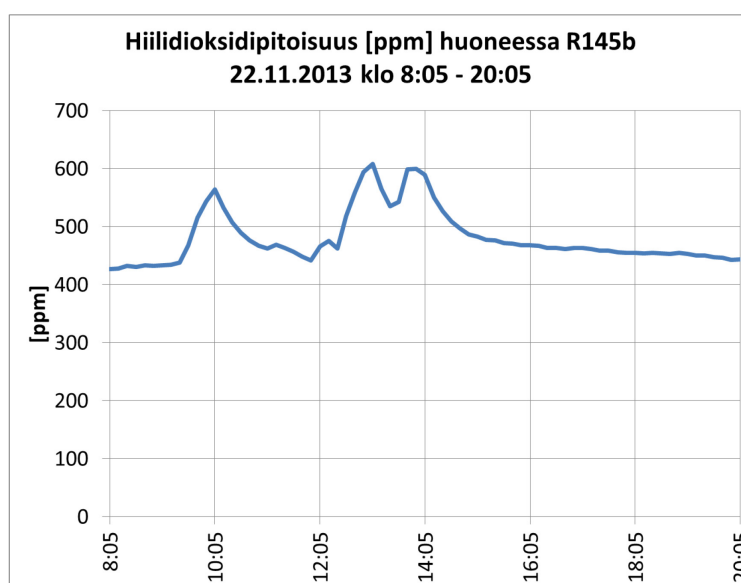
Liikuntasauamasta mitatut hiilidioksidipitoisuudet eri korkeuksilta olivat 780 ppm, 990 ppm ja 1020 ppm (Taulukko 23). Huoneen sisäilman hiilidioksidipitoisuus huoneen keskellä oli mittauksen alussa 460 ppm ja lopussa 500 ppm.

Hiilidioksidipitoisuudet liikuntasauamassa olivat 1,5–2-kertaiset huoneilman hiilidioksidipitoisuuksiin verrattuna. Mittaustulokset osoittavat, että rakenteen sisällä voi olla ympäristöään korkeampia hiilidioksidipitoisuuksia. Tulos viittaa mikrobikasvustoon rakenteessa.

Taulukko 23. Hiilidioksidipitoisuuksien mittaustulokset huoneen 145b liikuntasaumasta eri korkeuksilta 26.11.2013.

Mittauskorkeus lattiatasosta	Mittaussyvyys	Hiilidioksidipitoisuus
220 cm	5 cm	1020 ppm
200 cm	7 cm	990 ppm
10 cm	2 cm	780 ppm

Hiilidioksidipitoisuuden ajallista vaihtelua toimistohuoneessa seurattiin kahdentoista tunnin ajan. Hiilidioksidipitoisuus huonetilassa oli korkeimmillaan 605 ppm (Kuva 51).



Kuva 51. Hiilidioksidipitoisuus [ppm] huoneessa 145b 22.11.2013 klo 8.05 - 20.05 välisenä aikana.

Huoneessa ei ollut ketään klo 10.05 – 11.05, klo 13.05 – 13.25 eikä klo 14.05 – 15.05 välisinä aikoina. Näinä ajankohtina ihmisten aiheuttamaa hiilidioksidituottoa ei ollut ja ajasta riippuvan käyrän avulla saatiin laskettua huoneen ilmanvaihtokerroin [1/h] (kaava 6). Ilmanvaihtokerroin oli 1,7 1/h.

5.4.3 Tulosten tarkastelu hiilidioksidista homeaurion indikaattorina

Homeiden hiilidioksidituotot laskettiin kammioista mitatuista hiilidioksidipitoisuuksista. Laskennassa ei huomioitu alustana olleen kipsilevyn hiilidioksidiabsorptiota.

Laboratoriokoe osoitti, että suljetussa tilassa hiilidioksidipitoisuus voi nousta selkeästi ympäröivää ilmaa korkeammaksi, kun tilassa on homekasvua. Voidaan olettaa, että näin tapahtuu myös suljetussa rakenteessa. Yksittäismittauksina tulokset eivät kuvaa yleistä soveltuvuutta kenttäkäyttöön.

6 Johtopäätökset

Toimistohuonetta 335 tutkittiin hiilidioksidimittauksia lukuun ottamatta kaikilla uusilla menetelmillä. Tavanomaisilla mittauksilla tilasta olisi tunnistettu kosteusvaurioindikaattorimikrobi *Aspergillus versicolor* ja tilan TVOC-pitoisuuden olisi katsottu viittaavan epätavalliseen epäpuhtauslähteeseen. Uusilla menetelmillä saatiin lisäksi selville, että huoneilman vesihöyryn mukana kulkeutuneet epäpuhtaudet olivat toksisia hiiren hermosoluille (MNA) ja sian siittiöille, mutta ei munuaisepiteelisoluille (PK-15). Jatkuvan VOC-mittauksen avulla saatiin tietoa huoneen ilmatilan epäpuhtauskäyttäytymisestä ja ilmanvaihdon riittävyydestä tarkasteltuihin epäpuhtauksiin. Jatkuvalla mittauksella kyettiin tarkastelemaan ajankohtia, jolloin adsorbenttimenetelmällä kannattaa ottaa ilmanäytteet tarkempaa analyysia varten. Analyysituloksista havaittiin MVOC-pitoisuuksissa yhdistekohtaisia eroja eri ilmanvaihdon käyttöaikoina. Lisäksi saatiin selville, että tilan viljelyssä laskeutuneessa pölyssä kasvaneista erillispesäkkeistä valtaosa testatuista oli toksisia joko sian siittiösoluille tai PK-15 -soluille tai molemmille. Lisäksi laskeumamaljalla kasvanut *Acrostalagmus* sp. -kanta oli sytotoksinen PK-15 -soluille.

Sisätilan vesihöyryn kondenssikeräysmenetelmä haitallisten tilojen tunnistamisessa

Sisätilan vesihöyryn kondenssikeräysnäytteet erottelivat tilojen haitallisuutta, mutta eivät antaneet tietoa haitan aiheuttajasta tai lähteestä. Menetelmän jatkotutkimus ja laitteiston kehitys näytteen keräämiseksi sisätilan vesihöyrystä on kuitenkin perusteltua viidestä syystä.

1. Sisäilman vesihöyry edustaa tilan käyttäjän hengitysilmaa. Tämä eroaa pölynäytteiden toksisuustarkasteluista, joissa pöly voi olla vuosiakin vanhaa.
2. Vain muutaman vuorokauden keräysjaksoilla saatiin vesihöyryn kuljettamia sisäilman epäpuhtauksia kerättyä riittävästi toksisuuden mittaamiseen. Mukana oli haihtumattomia yhdisteitä, joista osa oli veteen liukenevia ja osa ei. Aiemmin suoraan sisäilmasta saadun toksisuusmittauksiin riittävän näytteen kerääminen on kestänyt 30 vuorokautta (Andersson ym. 2010).
3. Eri huoneista kerättyjen kondenssivesien toksisuudet erosivat sekä laadultaan että väkevyydeltään.
4. Rakennusmateriaalinäytteestä eristetty home eritti viljelymaljalla aineenvaihduntatuotteita sisältäviä nestepisaroita, jotka olivat toksisia kaikille kohdesoluille (siittiöt, MNA-, PK-15- ja FFL) vielä 1000–10000 -kertaisina laimennoksina. *Penicillium expansum* P61 -kannan erittämät nestepisarot sisälsivät suuret toksiinimäärät ketoglobosiinia, 5,6 % näytteen kuivapainosta, ja kommunesiini-toksiineja. Laboratoriomittauksissa todettiin, että noin 6 ng ketoglobosiinia aiheutti solutestissä selvästi näkyvän toksisuuden. Aiemmissa tutkimuksissa julkaistu korkein mitattu ketoglobosiinipitoisuus kosteusvaurioituneen rakennuksen suotimella sisäilmasta kerätty on 3,4 ng/m³ (Polizzi ym. 2009, s.1853).

5. Nestepisaroiden sisältämät toksiinit kulkeutuivat vesihöyryn mukana ilmatilassa.

Perustutkimusta kuitenkin tarvitaan selvittämään, tuottavatko homeet toksisia nestepisaroita myös rakennusmateriaalilla ja miten olosuhteet vaikuttavat tuottoon. Lisäksi tulisi tutkia toksisten nestepisaroiden fysikaalisia ominaisuuksia ja kulkeutumismekanismeja eri kosteuspitoisuuksissa.

Kondenssikeräyslaitteistoa tulee vielä kehittää ja tulosten tulkinta kaipaa lisätutkimuksia. Lisäksi tulee tutkia, mitä yhdisteitä menetelmällä saadaan kerättyä. Keräysastian tulisi olla suljettu haihtumisen estämiseksi. Laitteiston tulisi olla myös pienikokoinen, helposti siirrettävä ja puhdistettava sekä käyntiääneltään hiljainen. Säädetävän ilmavirran merkitystä keräysnäytteen määrään tulee tutkia. Mittaustulosten tulkintaan tarvitaan lukuisia tutkimuksia, kuten eri olosuhteiden vaikutus analyysiin tarvittavan kondenssiveden määrästä. Tutkittavia olosuhteita ovat esimerkiksi ulkoilman kosteuspitoisuuden, tilan tilavuuden sekä tilakohtaisen käyttötarkoituksesta riippuvan kosteuspitoisuuden ja -vaihtelun vaikutukset. Keräimen materiaalivalintoja tehtäessä tulee ottaa huomioon kemiallisen puhtauden ja puhdistettavuuden tärkeys.

Analyysimenetelmien valikkoa laajentamalla saataisi monipuolisempi kuva sisäilman laadusta. Tässä työssä mitattiin kondenssivedestä toksisuutta toiminnallisesti erilaisiin soluihin. Jos vesihöyryn kerääminen osoittautuu soveltuvan sisäilman haitallisuuden arviointiin, kannattaisi biologisten menetelmien valikkoa laajentaa myös immuunivasteiden ja allergeenien tutkimukseen. Kondenssikeräimellä saadun näytteen reaktioita voisi tutkia myös tilan käyttäjien omiin soluihin, esimerkiksi verinäytteisiin.

Tilan vesihöyrypitoisuuden keräysjakson aikainen mittaus on edellytys tulosten tarkastelulle, koska huoneilman vesihöyrypitoisuudella oli merkitystä kondenssiveden saantimäärään.

Maljoissa, joissa oli rakennuspaperi homekasvun ja kannen välisessä ilmatilassa, *Penicillium expansum* P61 -kannan kasvu aktivoitui ja itiöinti alkoi aiemmin kuin maljoissa, joissa rakennuspaperia ei ollut. Vaikuttaa siltä, että homekasvun nopeus voi riippua myös homeen hengitysilmasta.

Ajasta riippuva VOC-profiili

Eri yhdisteillä ja yhdisteryhmillä oli erilaiset ajasta riippuvat käyttäytymisprofiilit. Ajasta riippuva jatkuva mittaus antoi lisätietoa tutkittavan tilan kaasumaisten epäpuhtauksien käyttäytymisestä tilassa. VOC-adsorbenttinäytteiden tulosten tulkinnassa tulee huomioida tilan ilmanvaihdon käyntiajat. Jatkossa voidaan tutkia eri yhdisteisiin reagoivista jatkuvatoimisista sensoreista koottua kokonaisuutta, jonka avulla olisi mahdollista muodostaa kattavampi tilan sormenjälkiprofiili. Tällaista menetelmää tulisi testata myös suurissa rakennuskokonaisuuksissa, ja tutkia voidaanko eri tilojen sormenjälkiprofiilin perusteella tunnistaa välittömimmin

toimenpiteitä vaativat tilat. Tulosten tulkintaa varten tulisi mitata erilaisten muuttuvien ympäristöparametrien vaikutukset mittaustuloksiin.

Kaikissa toimistohuoneesta 335 Tenax-adsorbentteihin kerätyissä ilmanäytteissä TVOC-pitoisuus ylitti Työterveyslaitoksen raja-arvon toimistoympäristölle ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), mikä olisi viitannut sisäilman epätavanomaisiin lähteisiin (TTL, 2011). Tenax-adsorbenttimenetelmällä otetuista ilmanäytteistä ei tunnistettu kaikkein yleisimmin raportoituja MVOC:ja lukuun ottamatta 1-pentanol, α -pineeni sekä 2-heksanol. 2-heksanolipitoisuudet, $1,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, näyte BB3 ja $1,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, näyte AA3, olivat suuruusluokkaa, joita on raportoitu sekä kosteusvauriokohteista ($0,50\text{--}8,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) että verrokkikohteista ($0,46\text{--}2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Korpi ym. 2006, s. 21). Muihin tunnistettuihin yhdisteisiin ei ollut raportoituja arvoja.

Hiilidioksidin mittaus rakenteesta

Hiilidioksidipitoisuus voi nousta ainakin 10000 ppm suljetussa tilassa, jossa on homekasvua rakennusmateriaalilla.

Kenttämittauskoe osoitti, että rakenteesta voidaan mitata esimerkiksi ohuen neulan avulla rakenteen tilan hiilidioksidipitoisuus, ja mikäli pitoisuus on selkeästi korkeampi kuin ympäröivissä tiloissa, voidaan olettaa jonkin tuottavan rakenteessa tilaan hiilidioksidia. Tässä mielessä hiilidioksidimittauksia rakenteesta voidaan pitää yhtenä indikaattorina home- tai mikrobikasvusta. Toisaalta alhaista hiilidioksidipitoisuutta ei voida pitää merkinä, ettei homekasvua ole. Vaikka ympäristöään selkeästi korkeampi hiilidioksidipitoisuus rakenteen sisällä indikoisi mikrobikasvua rakenteessa, se ei anna tietoa lajista, volyyymista eikä haitallisuudesta. Lisäksi ulospäin harveneissa rakenteissa hiilidioksidi todennäköisesti laimenee nopeasti ulkoilman pitoisuuteen.

Mittaamista varten on tehtävä rakenteeseen reikä, joka rikkoo rakennetta. Tämä on huomioitava ilman- ja höyrynsulun tiivistystarpeena ja reiän teossa tulee välttää mahdollisuuksien mukaan ilman- ja höyrynsulun rikkomista. Näyte on nopea ottaa, eikä tarvitse erityisosaamista. Jatkossa voidaan tutkia etäluettavan, rakenteeseen jätettävän hiilidioksidimittauksen hyödyntämismahdollisuuksien korjauskohteissa, joissa vanhaa homekasvustoa ei varmuudella voida poistaa rakenteesta, vaan rakenne kapseloidaan.

Viljelymenetelmä ja pesäkkeiden toksisuus haitallisten tilojen tunnistamisessa

Sisätilahomeiden viljely ja haitta-aineiden etsintä erillispesäkkeistä erotteli huoneita sisätilaan kulkeutuneiden homekantojen toksinintuoton mukaan. Eri huoneiden pölynäyteviljelmien toksisten pesäkkeiden osuuksissa oli selkeitä eroja. Toksinintuottajiksi todetut homekannat tutkituissa toimistohuoneissa olivat ehdoton enemmistö viiden eri tilan mikrobistossa. Tätä ei olisi tiedetty lajitunnistuksen perusteella. Menetelmä on kuitenkin hidas ja kallus. Se vaatii useita näytteitä, pitkät kasvatusajat, paljon työtunteja ja erityisosaamista sekä erityislaitteita. Menetelmä soveltuisi laajamittaisiin tutkimuksiin, joissa eri tilojen homekantojen toksisia

ominaisuuksia on tarpeen verrata keskenään ja esimerkiksi sisäilmaan liittyviin haittaoireisiin.

Sisätilänäytteistä viljeltyjen homeiden erillispesäkkeiden toksisuustarkastelu antoi lisätietoa sisäilmassa olleiden homeitiöiden laadusta. Lajitunnistuksen perusteella toksiinituottajamikrobeiksi olisi luokiteltu *Aspergillus versicolor* (huoneet 335 ja 131b) sekä *chaetomium sp.* (huoneet 131b, 145b ja 146) ja mahdollisesti kosteusvaurioindikaattoreiksi edellisten lisäksi *Rhizopus sp* (huoneet 136 ja 223). Pesäketestissä todettiin lisäksi vakavasti toksisiksi *Aspergillus ustus*, *Penicillium expansum*, *Acrostalagmus sp*, sekä *Aspergillus niger*, jotka eivät kuulu toksisten kosteusvauriomikrobi-indikaattoreiden listaan. Pelkästään sukutasolle tunnistaminen ei olisi erotellut esimerkiksi toksisia *Penicillium*-kantoja niistä, joissa ei todettu toksiinituottoa. Viljeltyjen kantojen toksisuustarkastelulla saatiin lisätietoa tilan mahdollisista sisäilman epäpuhtauksista. Joissakin tutkituista huoneista toksisten homekantojen osuus kaikista oli 100 %.

Sokkelirakenteen korkkilevynäytteistä löydettyjä toksiinituottajalajeja (*Acrostalagmus sp*, *Aspergillus versicolor* ja *Penicillium expansum*) löytyi myös huoneen 131b pölynäytteestä. Itiöt ovat mahdollisesti kulkeutuneet sisätilaan ulkoseinärakenteen epätiiviyskohdista. Huone oli tiivistyskorjattu, ja pölynäytteessä saattoi olla vuosiakin vanhoja itiöitä, joten pölynäyte ei välttämättä anna kuvaa itiöiden kulkeutumisen nykytilanteesta. Toisaalta jos rakenteessa on toksiineja tuottavien homekantojen kasvua, ei voida olla varmoja, kulkeutuuko alipaineen vaikutuksesta toksiineja kuitenkin rakenteesta sisäilmaan.

Chaetomium-itiöitä havaittiin niistä huoneista, jotka keskittyivät rakennuksen liikuntasauaman ympäristöön. *Chaetomiumin* luontainen kasvuympäristö on maaperä, olki ja puu, ja se on yleinen puuta ja selluloosaa sisältävissä rakennusmateriaaleissa (Nielsen 2002). Toisaalta sen on esitetty liittyvän myös betonirakenteisiin (Andersen ym. 2011). Liikuntasauaman betonivaluun rakennusvaiheessa jätetty kovalevy on yksi vaihtoehto *Chaetomium*-itiöiden lähteeksi.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli kehittää menetelmiä paikallistamaan haitallisimmat tilat suurista homevaurioituneista rakennuskokonaisuuksista. Homeiden kiinteitä, nestemäisiä ja kaasumaisia aineenvaihduntatuotteita homevaurion indikaattorina tutkittiin yksittäisin kenttä- ja laboratoriokokein sisäilmahaittaisesta rakennuksesta. Työssä hyödynnettiin rakennusfysiikan, mikrobiologian, solutoksikologian ja kemian analytiikan menetelmiä.

Uutena näytteenottotekniikkana kehitettiin sisäilmanäytteen kerääminen vesihöyrystä. Sisäilman vesihöyryä kondensoitiin kenttäkokeissa nesteeksi keräysastiaan. Kondenssivesistä valmistettiin liuokset, joiden toksisuus tutkittiin solutoksikologisina menetelmin.

Sisätilan vesihöyryn kondensointi on toistettava ja kvantitatiivinen keräysmenetelmä, ja kerätty näyte edustaa tilan käyttäjien hengitysilman laatua. 3–5 vuorokauden keräysajalla saatiin kondenssivesinäytteitä, jotka soveltuivat solutoksikologisiin mittauksiin. Toksisuusmittaukseen riittävä näyte sisäilmasta saatiin lyhyemmällä keräysajalla kuin missään aiemmassa julkaistussa tutkimuksessa tähän mennessä.

Kondenssivesien solutoksikologisten mittausten tulokset osoittivat, että eri huoneista kerätyt kondenssivedet erosivat sekä toksisuuden että väkevyyden suhteen. Molempien kenttäkokekohteina olleiden toimistohuoneiden sisäilmasta saatiin kerättyä 17,5 ilmakeuutiometriä vastaava määrä vettä. Sen sisältämä haihtumaton aines, 300–1000 µg, oli myrkyllistä hermosoluille, munaisepiteelisoluille ja siittiöille. Näytteen toksisuuden aiheuttaja jäi epäselväksi.

Useat haittatiloista kasvatetut homekannat erittivät aktiivisesti nestepisararoita, joita saatiin kerättyä suoraan kasvatusmaljoilta ja joita voitiin suoraan käyttää toksisuustutkimuksiin. Merkittävä uusi tieto oli, että useiden kantojen nestepisaroiden toksisuus oli moninkertainen itse kasvustoon verrattuna ja monisatakertainen hiukkaskeräyspölyjen toksisuuteen verrattuna. Haittatilasta eristetyn *Penicillium expansum* -kannan erittämät nestepisararat olivat toksisia kohdesoluille vielä 1000–10000 -kertaisina laimennoksina. Pisarat sisälsivät ketoglobosiinia ja kommunesiinia. Näiden toksiinien todettiin kulkeutuvan ilmatilassa vesihöyryn mukana.

Huoneilman VOC-profiilin kinetiikkaa tutkittiin kenttäkokeessa kahdella eri online-kaasusensorilla. Profiilin mukaan valittiin ajankohdat, jolloin huoneesta otettiin VOC-adsorbenttinäytteet kvantitatiivisia mittauksia (GC-MS) varten. Ajasta riippuvan mittauksen tuloksissa näkyi toimistoympäristön ilmanvaihtoasetusten mukainen viikkosykli. Adsorbenttinäytteissä todettiin samansuuntainen ajallinen vaihtelu kuin VOC-sensoreilla. Toimistohuoneen ilmanäytteistä tunnistettiin mahdollisia mikrobiperäisiä alkoholeja, aldehydejä, aromaattisia hiilivetyjä, happoja, ketoneita sekä terpeenejä. On kuitenkin huomattava, että samoja yhdisteitä emittoituu myös muualta ympäristöstä.

MVOC-pitoisuuksissa oli merkittäviä eroja kaasusensorimittausten epäpuhtausprofiilin perusteella valituissa ajankohdissa. Mitatut alkoholiryhmän yhteispitoisuus kymmenkertaistui, aldehydiryhmän 17-kertaistui, terpeeniryhmän

viisinkertaistui ja ketoniryhmän yhteispitoisuus puolittui, kun ilmanvaihto oli ollut yli 12 tuntia pois päältä verrattuna arkipäivänä mitattuihin pitoisuuksiin. Eri yhdisteiden pitoisuusprofiilit erosivat toisistaan. Helposti haihtuvien yhdisteiden (VVOOC) pitoisuus oli kaikissa näytteissä lähes sama (289–293 µg/m³).

Homeen hiilidioksidituottoa suljetussa tilassa tutkittiin laboratoriokokeella kahdella eri sisäilmasta eristetyllä homekannalla, joita kasvatettiin kipsilevyalustalla (100 cm²). Hiilidioksidituotto riippui lajista, alustan kostutusliuoksesta ja kasvuston iästä. *Aspergillus westerdijkiae* PP2 tuotti yli 10000 ppm ja *Trichoderma atroviride* 1/226 3600 ppm hiilidioksidipitoisuuden kammioon (12,5 l) neljän viikon kasvatuksen aikana.

Kenttäkokeena mitattiin erään homevaurioepäillyn toimistohuoneen sisäseinärakenteesta hiilidioksidipitoisuus ja verrattiin sitä ympäristön hiilidioksidipitoisuuteen. Hiilidioksidipitoisuudet rakenteessa (780–1020 ppm) olivat 1,5–2-kertaiset huoneilman (460–500 ppm) hiilidioksidipitoisuuksiin verrattuna.

Hiilidioksidimittaus rakenteesta on helppo toteuttaa ja tulos saadaan heti. Alhaista hiilidioksidipitoisuutta ei voida pitää merkinä, ettei homekasvua ole. Korkea hiilidioksidipitoisuus rakenteesta mitattuna ilmaisee mikrobikasvuston läsnäolon, mutta ei kerro haitallisuudesta.

Työssä etsittiin kenttäkokeilla rakennuksen eri tilojen eroja ja yhtäläisyyksiä homeiden aiheuttamien haitta-aineiden suhteen jo julkaistulla menetelmällä (Andersson ym. 2012). Sisätilänäytteitä viljeltiin mallas-agarmaljoille, ja niistä neljässä viikossa kasvaneet pesäkkeet tutkittiin toksisuuden suhteen solutoksikologisin menetelmin.

Sisätilänäytteiden homeiden toksisuuskirjo antoi täsmätietoa sisäilman homeitiöiden laadusta ja erotteli tiloja haitallisuuden suhteen. Saman rakennuksen joissakin huoneissa 100 % tutkituista pesäkkeistä osoittautui toksiinintuottajiksi, joissakin huoneissa ei yksikään. Toksiset pesäkkeet olivat ehdoton enemmistö huoneissa, joiden käyttäjillä oli sisäilmaan liittyvää haittaoireilua.

Lisätutkimuksia tarvitaan selvittämään, tuottavatko homeet toksisia nestepisaraita myös rakennusmateriaalilla ja miten olosuhteet vaikuttavat tuottoon. Lisäksi tulisi tutkia toksisten nestepisaroiden fysikaalisia ominaisuuksia ja kulkeutumismekanismeja eri kosteuspitoisuuksissa. Jatkotutkimuksessa tulisi kartoittaa myös tekijöitä, jotka edesauttavat toksisten kantojen keskittymiä ja valikoitumista rakennuksiin tai joihinkin tiloihin.

Sisäilman vesihöyryn näytteenkeräysmenetelmän kehittämistä voidaan edistää jatkotutkimuksessa. Voidaan tutkia esimerkiksi, vaikuttaako ilmavirtauksilla nopeutettu keräysaika kerätyn näytteen laatuun ja miten näytteenkäsittelyä voidaan automatisoida. Laboratoriokokein tulisi mitata tunnetuilla hometoksiineilla laitteen keräystehoa.

Lisäksi etäluettavan hiilidioksidianturin soveltuvuutta homevaurioituneen rakennuksen kriittisten rakenteiden korjauksen onnistumisen seurantaan tulisi tutkia.

Lähdeluettelo

Adams, R., Miletto, M., Taylor, J. W. & Bruns, T. D. 2013. Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances. *The ISME Journal*. Vol. 7. S.1262–1273.

Adan, O. C. & Samson, R. A. 2011. Introduction. Teoksessa: Adan, O.C. & Samson, R.A. (toim.) *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, S. 15–38.

Adan, O., Huinink, H. & Bekker, M. 2011. Water relations of fungi in indoor environments. Teoksessa: Adan, O.C. & Samson, R.A. (toim.) *Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, S. 41–65.

Aikivuori, A. 2001. Terveen rakennuksen evoluutio. [Verkkodokumentti]. Tutkimusraportti. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. [Viitattu 12.12.2013]. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2001/terveen_rakennuksen_evoluutio.pdf.

Ali-Vehmas, T., Louhi, M. & Sandholm, M, 1991. Automation of the resazurin reduction test using fluorometry of microtitration trays. *Zentralbl. Vet Med B*. Vol. 38. S. 358–372.

Andersen, B., Frisvad, J. C., Sondegaard, I., Rasmussen, I. S. & Larsen, L.S. 2011. Associations between fungal species and water-damaged building materials. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 77:12. S. 4180 - 4188.

Andersson, M. A. 2014. Tutkijatohtori. Helsingin yliopisto, Elintarvike- ja Ympäristötieteiden laitos. Haastattelu 30.4.2014.

Andersson, M. A., Mikkola, R., Rasimus, S., Hoornstra, D., Salin, P., Rahkila, R., Heikkinen, M., Mattila, S., Peltola, J., Kalso, S. & Salkinoja-Salonen, M. 2010. Boar Spermatozoa as a biosensor for detecting toxic substances in indoor dust and aerosols. *Toxicology in Vitro*. Vol. 24. S. 2041 - 2052.

Andersson, M. A., Mikkola, R., Raulio, M., Kredics, L., Maijala, P. & Salkinoja-Salonen, M. 2009. Acrebol, a novel toxic peptaibol produced by an *Acremonium exuviarum* indoor isolate. *Journal of Applied Microbiology*. Vol. 106:3. S. 909–923.

Andersson, M. A., Salkinoja-Salonen, M. & Mikkola, R. 2012. Uusi menetelmä sisäilmatoksiinien löytämiseen: LC-MS-biotesti yhdistelmä. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) *Sisäilmastoseminaari 2012*. SIY Raportti 30. Sisäilmatieto oy. S. 37–42.

Andersson, M. A., Salo, J., Lipponen, O., Salonen, P., Viljanen, M., Ojamo, H., Mikkola, R., Sistonen, E., Gasik, M., Teplova, V., Salin, M., & Salkinoja-Salonen, M. 2014. Rakennusten kemikaalien joukossa on myrkyllisiä, herkistäviä ja haittamikrobeja suosivia yhdisteitä. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) *SIY Raportti 32*. Sisäilmatieto Oy, Espoo. S. 371–376.

Asikainen, V. & Peltola, S. (toim.) Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. Opetushallitus. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy. 247 s.

Asikainen, V. (toim.) 2008. Kiinteistön omistajan opas sisäilmaongelmaisten koulurakennusten kunnon tutkimiseen ja korjaushankkeisiin. Teoksessa: Asikainen, V. & Peltola, S. (toim.) Sisäilmaongelmaisten koulurakennusten korjaaminen. Opetushallitus. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy. S. 9–48.

Bloom, E., Bal, K., Nyman, E., Must, A. & Larsson, L. 2007. Mass Spectrometry-based strategy for direct detection and quantification of some mycotoxins produced by *Stachybotrys* and *Aspergillus* spp. in indoor environments. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.73:13. S. 4211 - 4217.

Bloom, E., Grimsley, L.F., Pehrson, C., Lewis, J. & Larsson, L. 2009. Molds and mycotoxins in dust from water-damaged homes in New Orleans after hurricane Katrina. *Indoor air*. Vol. 19:2. S. 153–158.

Bornehag, C.G., Sundell, J., Bonini, S., Custovic, A., Malmberg, P., Skerfving, S., Sigsgaard, T. & Verhoeff, A. 2001. Dampness in Buildings and Health - Nordic Interdisciplinary Review of the Scientific Evidence on Associations. *Indoor Air*. Vol.11. S. 72 - 82.

Brasel, T. L., Douglas, D.R., Wilson, S.C. & Strauss, D.C. 2005. Detection of Airborne *Stachybotrys chartarum* Macrocytic Trichotecene Mycotoxins in the Indoor Environment. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.71:11. S. 7376–7388.

Burke, H. 2006. How Long Do Spores Stay in the Air?. [Verkkajulkaisu]. EMLab. The Environmental Reporter. Vol. 4:5. [Viitattu 2.5.2014]. Saatavissa: www.emlab.com/s/sampling/env-report_05_2006.html.

Cabral, J. P. 2010. Can we use indoor fungi as bioindicators of indoor air quality? Historical perspectives and open questions. *Science of the Total Environment*. Vol.408. S. 4285 - 4295.

Database, C. 2014. Chemicalbook. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.3.2014]. Saatavissa: <http://www.chemicalbook.com/>.

Decker, H. & van Holde, K. E. 2011. Oxygen and the Evolution of Life. Berliini: Springer-Verlag. 200 s.

Dijksterhuis, J. 2011. The fungal cell. Teoksessa: Adan, O.C. & Samson, R.A. (toim.) Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. S. 83 - 101.

Eduskunnan tarkastusvaliokunta, 2013. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. [Verkkodokumentti] Tarkastusvaliokunnan mietintö 1/2013. [Viitattu 13.5.2014]. Saatavissa: <http://espoo05.hosting.documenta.fi/kokous/2014296580-11-1.PDF>.

Fiedler, K., Schültz, E. & Geh, S. 2001. Detection of microbial volatile organic compounds produced by moulds on various materials. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. Vol.204. S. 111 - 121.

Figaro Product Information. 2013. [Verkkojulkaisu]. [Viitattu: 1.2.2013]. Saatavissa: <http://www.figarosensor.com/products/>.

Frankel, M., Hansen, E. W. & Madsen, A. M. 2013. Effect of relative humidity on the aerosolization and total inflammatory potential of fungal particles from dust-inoculated gypsum board. *Indoor Air*. Vol. 24. S. 16–28.

Gareis, M. & Gareis, E.-M. 2007. Guttation droplets of *Penicillium nordicum* and *Penicillium verrucosum* contain high concentrations of the mycotoxins ochratoxin A and B. *Mycopathologia*. Vol.163. S. 207 - 214.

Gareis, M. & Gottschalk, C. 2014. *Stachybotrys* spp. and the guttation phenomenon. *Mycotoxin Research*. DOI 10.1007/s12550-014-0193-3. 9 s.

Gottschalk, C., Bauer, J. & Meyer, K. 2008. Detection of satratoxin G and H in indoor air from a water-damaged building. *Mycopathologia*. Vol. 166:2. S. 103–107.

Grovel, O., Pouchus, Y. F. & Verbist, J.-F. 2003. Accumulation of gliotoxin, a cytotoxic mycotoxin from *Aspergillus fumigatus*, in blue mussel. *Toxicon*. Vol. 42. S. 297 - 300.

Gutarowska, B., Sulyok, M. & Krska, R. 2010. A Study of the Toxicity of Mould Isolated from Dwellings. *Indoor Built Environment*. Vol. 19:6. S. 668 - 675.

Hänninen, O. & Asikainen, A. 2013. Efficient reduction of indoor exposures – Health benefits from optimizing ventilation, filtration and indoor source control. Tampere: Terveystien ja hyvinvoinnin laitos. Raportti: 2013_002. 95 s.

Hoornstra, D., Andersson, M. A., Johansson, T., Pirhonen, T., Hatakka, M. & Salkinoja-Salonen, M. 2004. Mitochondrial toxicity detected in a health product with a boar spermatozoan bioassay. *Alternatives to laboratory animals*, Vol.32:4. S. 407–416.

Horinek, D., Herz, A., Vrbka, L., Sedlmeier, F., Mamatkulov, S. & Netz, R. 2009. Specific ion adsorption at the air/water interface: The role of hydrophobic solvation. *Chemical Physics Letters*. Vol. 479:4–6. S. 173–183.

Hutwimmer, S., Wang, H. & Strasser, H. 2010. Formation of exudate droplets by *Metarhizium anisopliae* and the presence of destruxins. *Mycologia*. Vol. 102, S. 1 - 10.

Hyvärinen, A., Meklin, T., Vepsäläinen, A. & Nevalainen, A. 2002. Fungi and actinobacteria in moisture-damaged building materials - concentration and diversity. *International Biodeterioration & Biodegradation*. Vol. 49. S. 27 - 37.

Jennings, D. 1991. The role of droplets in helping to maintain a constant growth-rate of aerial hyphae. *Mycological Research*. Vol.95. S. 883 - 884.

Kauriinvaha, E., Sutela, R., Yrjölä, R. & Viljanen, M. 2001. Kosteusteknisesti turvallinen sahanpurueristeinen pientalo. Teknillinen korkeakoulu talonrakennustekniikan julkaisuja. Helsinki: Oy Edita Ab. 87s.

- Korpi, A., Järnberg, J. & Pasanen, A.-L. 2006. Microbial volatile organic compounds. Arbete och Hälsa Report 2006:13. Stockholm: Arbetslivsinstitutet. 78 s.
- Korpi, A., Pasanen, A.-L. & Pasanen, P. 1998. Volatile Compounds Originate from Mixed Microbial Cultures on Building Materials under Various Humidity Condition. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 64. S. 2914 - 2919.
- Krause, J. D. 2005. Generation of Carbon Dioxide and Mobilization of Antimony Trioxides by Fungal Decomposition of Building Materials. [Verkkodokumentti]. Väitöskirja. University of South Florida. [Viitattu 10.10.2013]. Saatavissa: <http://scholarcommons.usf.edu/etd/730/>.
- Kuske, M., Romain, A.-C. & Nicholas, J. 2005. Microbial volatile organic compounds as indicators of fungi. Can electronic nose detect fungi in indoor environments?. *Building and Environment*. Vol. 40. S. 824 - 831.
- Kymäläinen, H.-R., Koivula, M., Virta, J. & Sjöberg, A.-M. 2005. Kuitupohjaisten lämmöneristeiden mikrobiemissiot. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 23. Sisäilmätieto Oy. S. 127–132.
- Kärki, J.-P. & Öhman, H. 2007. Homevaurioiden korjausopas. Kuopion yliopisto Koulutus- ja kehittämiskeskus. Tutkimuksia ja selvityksiä 6/2007. Kuopio: Kopijyvä. 73 s.
- Kärki, J.-P., Ahonen, U., Pirinen, J., Riippa, T., Karjalainen, J. & Öhman, H. 2006. Korjaamalla terveeksi. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 24. Sisäilmätieto Oy. S. 175– 180.
- Lignell, U., Meklin, T., Putus, T. & Nevalainen, A. 2006. Oireet ja mikrobipitoisuudet koulukorjausten onnistumisen osoittajina. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 24. Sisäilmätieto Oy. S. 207–212.
- Matysik, S., Herbarth, O. & Mueller, A. 2008. Determination of volatile metabolites originating from mould growth on wall paper and synthetic media. *Journal of Microbiological Methods*. Vol. 75. S. 182 - 187.
- Matysik, S., Herbarth, O. & Mueller, A. 2009. Determination of microbial volatile organic compounds (MVOC) by passive sampling onto charcoal sorbents. *Chemosphere*. Vol. 76. S. 114 - 119.
- Menetrez, M. Y. & Foarde, K. K. 2004. Emission Exposure Model for the Transport of Toxic Mold. *Indoor and Built Environment*. Vol. 13. S. 75 - 82.
- Mikkola, R., Andersson, M. A., Kredics, L., Grigoriev, P.A., Sundell, N. & Salkinoja-Salonen, M. 2012. 20-Residue and 11-residue peptaibols from the fungus *Trichoderma longibrachiatum* are synergistic in forming Na/K-permeable channels and adverse action towards mammalian cells. *The FEBS Journal*. Vol. 279:22. S. 4172–4190.
- Nielsen, K. F. 2002. Mould growth on building materials - Secondary metabolites, mycotoxins and biomarkers. Väitöskirja. Technical University of Denmark BIOCentrum-DTU. Horsholm: By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut. 122 s.

Nielsen, K. F. 2003. Mycotoxin production by indoor molds. *Fungal Genet. Biol.*, Vol. 39:2. S. 103–107.

NLM, 2014. ChemDPlus Lite, Toxicology Data network. [Verkkojulkaisu]. United States National Library of medicine. [Viitattu 5.3.2014]. Saatavissa: <http://chem.sis.nlm.nih.gov/chemidplus>.

Pasanen, A.-L., Korpi, A., Kasanen, J.-P. & Pasanen, P. 1998. Critical aspect on the significance of microbial volatile metabolites as indoor air pollutants. *Environmental International*. Vol. 24:7. S. 703–712.

Pasanen, P., Korpi, A., Kalliokoski, P. & Pasanen, A.-L. 1997. Growth and Volatile Metabolite Production of *Aspergillus versicolor* in House Dust. *Environment International*. Vol.23:4. S. 425 - 432.

Peltola, J., Ritieni, A., Mikkola, R., Grigoriev, P., Pocsfalvi, G., Andersson, M. A. & Salkinoja-Salonen, M. 2014. Biological Effects of *Trichoderma harzianum* Peptaibols on Mammalian Cells. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 80:7. S. 4996–5004.

Pirinen, J. 2006. Pientalojen mikrobivauriot - Lähtökohtana asukkaiden kokemat terveyshaitat. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto Rakennustekniikan laitos. Hengitysliiton julkaisuja 19/2006. Hengitysliitto Heli ry. 128 s.

Polizzi, V. ym. 2012. Influence of various growth parameters on fungal growth and volatile metabolite production by indoor molds. *Science of the Total Environment*, Vol.414:1. S. 277–286.

Polizzi, V., Delmulle, B., Adams, A., Moretti, A., Susca, A., Picco, A.M., Rosseel, Y., Kindt, R., Bocxlaer, J.V., De Kimpe, N., Van Peteghem, C. & De Saeger, S. 2009. Fungi, mycotoxins and microbial volatile organic compounds in mouldy interiors from waterdamaged buildings. *Journal of Environmental Monitoring*. Vol.11. S. 1849 - 1858.

Putus, T. 2013. Alapohjan tiivistyskorjaukset ja biosidien käyttö – kokemuksia rakennusten käyttäjien oireilusta. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 31. Sisäilmatie Oy. S. 305–310.

Päkkilä, T. 2012. Mikrobin kulkeutuminen sisäilmaan paine-eron vaikutuksesta. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Rakennustekniikan laitos. 148 s. [Viitattu 10.1.2013]. Saatavissa: <http://uutiset.hometalkoot.fi/component/content/615/1124.html>.

Raportti myrkyllisyysmittauksesta. (2010a). Inspector Sec Oy.

Raportti myrkyllisyysmittauksesta. (2010b). Inspector Sec Oy.

Reijula, K., Ahonen, G., Alenius, H., Holopainen, R., Lappalainen, S., Palomäki, E. & Reiman, M. 2012. Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Eduskunnan tarkastusvaliokunnan julkaisuja 1/2012. 205 s.

Riipinen, I. & Lehtipalo, K. 2013. Hiukkaskäsikirja. [Verkkojulkaisu]. Helsingin yliopisto Fysiikan laitos Ilmakehätieteiden ja geofysiikan osasto. [Viitattu 20.11.2013]. Saatavissa: www.hiukkastieto.fi.

Salin, P., Salin, J., Andersson, M. A., Holma, T., Nelo, K. & Salkinoja-Salonen, M. 2012. Sisätilanäytteiden toksisuus ja terveyshaittaoireet kouluissa. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 30. Espoo: Sisäilmätieto Oy. S. 159–164.

Salkinoja-Salonen, M., Andersson, M., Rasimus, S., Salin, P., Mikkola, R., Alenius, H., Matikainen, S., Leino, M. & Salin, R. 2011. Bioaerosolien toksiinien tuotto ja hiukkaskoko työtilojen sisäilman puhtauden mittarina. Teoksessa: Säteri, J. & Backman, H. (toim.) SIY Raportti 29. Sisäilmätieto Oy. S. 103–108.

Salonen, H. 2009. Indoor air contaminant in office buildings. Väitöskirja. Kuopion yliopisto Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta. Työterveyslaitos, Tutkimusraportti Nr. 87, TTL, Helsinki 222 s.

Scott, J., Summerbell, R. & Green, B. 2011. Detection of indoor fungi bioaerosols. Teoksessa: Adan, O. & Samson, R. (toim.) Fundamentals of mold growth in indoor environments and strategies for healthy living. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers. S. 353–383.

Seo, S.-C., Reponen, T., Levin, L. & Grinshpun, S. 2009. Size-fractionated (1->3)-beta-D-glucan concentrations aerosolized from different moldy building materials. Science of the Total Environment. Vol.407. S. 806 - 814.

Sisäilmasto- ja kosteustekninen kuntotutkimus. (2013) Suomen Sisäilmaston Mittauspalvelu.

STM 2003. Asumisterveysohje, Helsinki: Sosiaali- ja terveysministeriön oppaita 2003:1. 93 s.

STM 2008. Asumisterveysopas. Ympäristö ja Terveys -lehti. 200 s.

Sunesson, A.-L., Nilsson, C.-A., Carlson, R., Blomquist, G. & Andersson, B. 1997. Production of volatile metabolites from *Streptomyces albidoflavus* cultivated on gypsum board and tryptone glucose extract agar - influence of temperature, oxygen and carbon dioxide levels. Annual Occupational Hygiene. Vol. 41:4. S. 393 - 413.

THL, TTL, Helsingin yliopisto & Turun yliopisto 2012. [Verkkojulkaisu]. Loppuraportti: Toksikologisen menetelmän kehittämissuunnitelma TOXTEST 2010–2012. [Viitattu 12.8.2013]. Saatavissa: http://www.stm.fi/c/document_library/get_file?folderId=6556944&name=DLFE-25910.pdf

TTL 2011. Työterveyslaitoksen käyttämiä viitearvoja sisäympäristön ongelmien tunnistamisessa puhtaissa toimistoympäristöissä. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.3.2014] Saatavissa: http://www.ttl.fi/fi/tyoymparisto/sisailma_ja_sisaymparisto/Documents/viitearvoja.pdf.

Tuomi, T., Reijula, K., Johnsson, T., Hemminki, K., Hintikka, E.-L., Lindroos, O., Kalso, S., Koukila-Kähkölä, P., Mussalo-Rauhamaa, H. & Haahtela, T. 2000. Mycotoxins in Crude Building Materials from Water-Damaged Buildings. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol.66:5. S. 1899 - 1904.

Täubel, M., Sulyok, M., Vishwanath, V., Bloom, E., Turunen, M., Järvi, K., Kauhanen, E., Krska, R., Hyvärinen, A., Larsson, L. & Nevalainen, A. 2011. Co-occurrence of toxic bacterial and fungal secondary metabolites in moisture-damaged indoor environments. *Indoor Air*. Vol.21. S. 368-375.

Wirtanen, L. 2005. Influence of Moisture and Substrate on the Emission of Volatile Organic Compounds from Wall Structures. Väitöskirja. Espoo: Teknillinen korkeakoulu Rakennusmateriaalitekniikka. Raportti 19. Helsinki: Edita Prima Oy. 321 s.

YK 2003. Guidelines for Estimating and Reporting Emission Data Under the Convention on Long-range Transboundary Air Pollution. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.7.2013]. Saatavissa: www.unece.org/fileadmin/DAM/env/Irtap/ExecutiveBody/Air_Pollutionwithcover_15_ENG.pdf

Ympäristöministeriö 1997a. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen korjaus. Ympäristöopas 29. Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy. 74 s.

Ympäristöministeriö 1997b. Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Ympäristöopas 28. Helsinki: Ympäristöministeriö. 143 s.

Zeringue, H. J., Bhatnagar, D. C. & Cleveland, T. E. 1993. C15H24 Volatile Compounds Unique to aflatoxigenic Strains of *Aspergillus flavus*. *Applied and Environmental Microbiology*. Vol. 59. S. 2264 - 2270.

Zuo, Z. & Ma, D. 2011. Enantioselective Total Syntheses of Communesins A and B. *Angewandte Chemie - International Edition*. Vol. 50:50. S. 12008–12011.

Liite A. Mikrobiperäisiä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä ja niiden kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia.

Taulukko A1. Joitakin mikrobiperäisiä haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (MVOC) ja niiden kemialliset kaavat, moolimassat, CAS-numerot sekä fysikaalisia ominaisuuksia (Korpi ym. 2006, s. 6–17).

Yhdiste	Kemiallinen kaava	Moolimassa g/mol	CAS-numero	Kiehumispiste [°C] (101,3 kpa)	Höyrynpaine [kPa] (25 °C)	log K _{ow}	
						kokeel- linen	laskettu
Alkoholeja							
1-Butanoli	C ₄ H ₁₀ O	74,12	71-36-3	117,7	0,587-0,73°	0,88	
4-Dekanoli	C ₁₀ H ₂₂ O	158,28	2051-31-2	210,5	0,0049		3,71
Etanoli	C ₂ H ₆ O	46,07	64-17-5	78,5	5,9°	-0,32	
2-Etyyli-1-heksanoli	C ₈ H ₁₈ O	130,23	104-76-7	183,5	0,007° 0,048		2,73
2-Heptanoli	C ₇ H ₁₆ O	116,2	543-49-7	159,2	0,164	2,31	
1-Heksanoli	C ₆ H ₁₄ O	102,18	111-27-3	157,1 - 157,5	0,124	2,03	
2-Metyyli-1-propanoli	C ₄ H ₁₀ O	74,12	78-83-1	108	1,33	0,65	
2-Metyyli-1-butanoli	C ₅ H ₁₂ O	88,15	137-32-6	128	0,416	1,29	
3-Metyyli-1-butanoli	C ₅ H ₁₂ O	88,15	123-51-3	130,5	0,316	1,16	
3-Metyyli-2-butanoli	C ₅ H ₁₂ O	88,15	598-75-4	111,5	1,22	1,28	
1-Oktanoli	C ₈ H ₁₈ O	130,23	111-87-5	194,5 - 195	0,0106	3	
3-Oktanoli	C ₈ H ₁₈ O	130,23	589-98-0 20296-29-1	169	0,068		2,73
1-Okten-3-oli	C ₈ H ₁₆ O	128,21	3391-86-4	180	0,071		2,6
2-Okten-1-oli	C ₈ H ₁₆ O	128,21	22104-78-5	195,8 ± 8,0	0,014		2,59
1-Pentanoli	C ₅ H ₁₂ O	88,15	71-41-0	137,8	0,218°	1,42	
2-Pentanoli	C ₅ H ₁₂ O	88,15	6032-29-7	119,0-119,3	0,815	1,19	
1-Propanoli	C ₃ H ₈ O	60,1	71-23-8	97,2-97,8	1,9-2°	0,25 0,34	
3-Metyyli-2-pentanoni	C ₆ H ₁₂ O	100,16	565-61-7	117,3-117,5	2,42		1,16

Taulukko A1. jatkoa

Aldehydeja							
Asetaldehydi	C ₂ H ₄ O	44,05	75-07-0	20,2	100 ^c	-0,34	
Akroleiini	C ₃ H ₄ O	56,06	107-02-8	52,5	28,5 ^c		-0,01
Bentsaldehydi	C ₇ H ₆ O	106,12	100-52-7	178-179	0,133 ^d		1,48
Dekanaali	C ₁₀ H ₂₀ O	156,27	112-31-2	208	0,028		3,76
Formaldehydi	CH ₂ O	30,03	50-00-0	-19 - -19,5	519 462	0,35	
Heptanaali	C ₇ H ₁₄ O	114,19	111-71-7	152,8	0,469		
Heksanaali	C ₆ H ₁₂ O	100,16	66-25-1	131	1,507		1,78
Nonanaali	C ₉ H ₁₈ O	142,24	124-19-6	191	0,049		3,27
Oktanaali	C ₈ H ₁₆ O	128,21	124-13-0	163,4	0,28		2,78
Fenyyliaetaldehydi	C ₈ H ₈ O	120,15	122-78-1	200	0,049		
Hiilivetyjä							
Bentseeni	C ₆ H ₆	78,11	71-43-2	80	12,7	1,18-1,9	
Etylibentseeni	C ₈ H ₁₀	106,17	100-41-4	136,2	1,28	3,15	
1-Hepteeni	C ₇ H ₁₄	98,19	592-76-7	94	7,62		3,99
Tolueeni	C ₇ H ₈	92,14	108-88-3	110,6	2,93 ^c	2,11-2,80	
1-Metyyli-4-metyyli-etylibentseeni	C ₁₀ H ₁₄	134,22	99-87-6	177,1	0,2		4,1
2-Metyyli-1,3-butadieeni	C ₅ H ₈	68,12	78-79-5	34,07	73,33		2,42
1-Noneeni	C ₉ H ₁₈	126,24	124-11-8	146,9	0,72		5,15
1,3-Oktadieeni	C ₈ H ₁₄	110,2	1002-33-1	130-131	1,79		
1-Okteeni	C ₈ H ₁₆	112,21	111-66-0	121,2	2,32		4,57
Styreeni	C ₈ H ₈	104,15	100-42-5	145,2	0,81	2,95	
Ksyleenit	C ₈ H ₁₀ 1 xylene	106,17 1 xylene	1330-20-7	129-150 ^b	0,8-0,867 ^c	3,12-3,20	

Taulukko A1. jatkoa

Happoja							
Etikkahappo	C ₂ H ₄ O ₂	60,05	64-19-7	117,9	1,52 ^c	-0,31	
Kapryylihapo	C ₈ H ₁₆ O ₂	144,21	124-07-2	237;239,7	0,133 ^e	0,63	
Eettereitä							
Anisoli	C ₇ H ₈ O	108,14	100-66-3	155,5	0,472		2,11
1,3-Dimetoksibentseeni	C ₈ H ₁₀ O ₂	138,17	151-10-0	217,5	0,026		2,21
2,5-Dimetyylifuraani	C ₆ H ₈ O	96,13	625-86-5	93,1 ± 9,0	7,61		2,24
1-Metoksi-3-metyylibentseeni	C ₈ H ₁₀ O	122,17	100-84-5	177	0,24		2,66
1-Metoksi-3-metyylibutaani	C ₆ H ₁₄ O	102,17	626-91-5	90	11,06		1,96
2-Metyylifuraani	C ₅ H ₆ O	82,1	534-22-5	65	23,48		1,85
3-Metyylifuraani	C ₅ H ₆ O	82,1	930-27-8	65-66	21,46		1,91
2,3,5-Trimetyylifuraani	C ₇ H ₁₀ O	110,15	10504-04-8	121-122	1,92		
Estereitä							
Etyyliasettaatti	C ₄ H ₈ O ₂	88,11	141-78-6	76,5-77,5	9,73 ^c	0,66	
Etyyli-2-metyylipropionaatti	C ₆ H ₁₂ O ₂	116,16	97-62-1	110,1	2,88		1,77
Etyylipropionaatti	C ₅ H ₁₀ O ₂	102,13	105-37-3	99,1	5	1,21	
Metyyliasettaatti	C ₃ H ₆ O ₂	74,08	79-20-9	56,9	23,1 ^c 21,7 ^c	0,18	
3-Metyyli-1-butyliasettaatti	C ₇ H ₁₄ O ₂	130,19	123-92-2	142,5	0,75	2,26	
Metyyli-2-metyylipropionaatti	C ₅ H ₁₀ O ₂	102,13	547-63-7	93-95	6,72		1,28
Propyyliasettaatti	C ₅ H ₁₀ O ₂	102,13	109-60-4	101,6	4,67	1,39 1,60	
Ketoneja							
Asetoni	C ₃ H ₆ O	58,08	67-64-1	56,2	24-24,7 ^c	-0,24	
2-Butanoni	C ₄ H ₈ O	72,11	78-93-3	79,6	10,33 ^c	0,26 0,29	

Taulukko A1. jatkoa

Syklopentanoni	C ₅ H ₈ O	84,12	120-92-3	130,6	1,52		0,24
2-Heptanoni	C ₇ H ₁₄ O	114,19	110-43-0	150,6; 151,5	0,213 0,28	2,03	
2-Heksanoni	C ₆ H ₁₂ O	100,16	591-78-6	126-128	1,47 ^c 0,36 ^c	1,38	
3-Hydroksi-2-butanoni	C ₄ H ₈ O ₂	88,11	513-86-0	148	0,256		-0,36
3-Metyyli-2-butanoni	C ₅ H ₁₀ O	86,13	563-80-4	93	8,6		0,84
4-Metyyli-3-heksanoni	C ₇ H ₁₄ O	114,19	17042-16-9	135-138	1,075		1,66
2-Nonanoni	C ₉ H ₁₈ O	142,24	821-55-6	194	0,086		3,14
2-Oktanoni	C ₈ H ₁₆ O	128,21	111-13-7	173	0,23		2,37
3-Oktanoni	C ₈ H ₁₆ O	128,21	106-68-3	157-162	0,267		2,22
2-Pentanoni	C ₅ H ₁₀ O	86,13	107-87-9	102	3,59 ^c	0,91	
3-Pentanoni	C ₅ H ₁₀ O	86,13	96-22-0	102	4,7	0,99	
2-Undekanoni	C ₁₁ H ₂₂ O	170,29	112-12-9	231,5	0,013		4,09
Laktoni							
Gamma-Dekalaktoni	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	170,25	706-14-9	266,7 ± 8,0	0,00113		
Terpeenejä							
Akoradieeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	24048-44-0	273,1 ± 15,0	0,0013		6,99
β-Bisaboleeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	495-61-4	275,4 ± 15,0	0,0011		7,12
Kadineeni	C ₁₅ H ₂₆	206,37	29350-73-0	120 ^f	5,33 ^g		6,19
Δ ³ -Kareeni	C ₁₀ H ₁₆	136,24	13466-78-9	167-170	0,248		4,61
Kamfeeni	C ₁₀ H ₁₆	136,24	79-92-5	158,5	0,333		4,22
β-Kariofylleeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	87-44-5	268,4 ± 10,0	0,0017		6,3
β-Khamigreeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	18431-82-8	273,2 ± 15,0	0,0013		7,02
α-Kurkumeeni	C ₁₅ H ₂₂	202,34	644-30-4	276,3 ± 15,0	0,0011		6,29
β-Elemeeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	33880-83-0	252,1 ± 15,0	0,0042		7,04
α-Farneseeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	502-61-4	279,6 ± 15,0	0,0009		7,1
β-Farneseeni	C ₁₅ H ₂₄	204,35	18794-84-8	272,5 ± 15,0	0,0013		7,17

Taulukko A1. jatkoa

Geosmiini	$C_{12}H_{22}O$	182,31	23333-91-7 19700-21-1	$252,4 \pm 8,0$	0,00041		3,57
α -Gurjuneeni	$C_{15}H_{24}$	204,35	489-40-7	$263,9 \pm 7,0$	0,0022		6,18
Limoneeni	$C_{10}H_{16}$	136,24	138-86-3	170	0,28 ^c		4,57
Longifoleeni	$C_{15}H_{24}$	204,35	475-20-7	250-255	0,0042		5,48
2-Metyyli-isoborneoli	$C_{11}H_{20}O$	168,28	2371-42-8	$208,7 \pm 8,0$	0,0065		3,31
β -Fallandreeni	$C_{10}H_{16}$	136,24	555-10-2	171,5	0,21		4,7
α -Pineeni	$C_{10}H_{16}$	136,24	80-56-8	155	0,47		4,83
β -Pinene	$C_{10}H_{16}$	136,24	127-91-3	166	0,32		6,12
Thujopseeni	$C_{15}H_{24}$	204,35	470-40-6	$256,5 \pm 7,0$	0,0033		6,12
Trikodieeni	$C_{15}H_{24}$	204,35	28624-60-4	$256,7 \pm 15,0$	0,0033		
Rikki- ja typpiyhdisteitä							
Dimetyylidisulfidi	$C_2H_6S_2$	94,19	624-92-0	109,8	3,83	1,77	
Dimetyylitrisulfidi	$C_2H_6S_3$	126,27	3658-80-8	$183,1 \pm 23,0$	0,142		1,87
2-Isopropyli-3-metoksi-pyratsiini	$C_8H_{12}N_2O$	152,2	25773-40-4	$210,8 \pm 30,0$	0,036		2,37
2-Metoksi-pyratsiini	$C_5H_6N_2O$	110,12	3149-28-8	153,6	0,56		0,73

c) 20 °C, d) 26 °C, e) 92.3 °C, erittäin matala huoneenlämmössä, f) 1,2 kPa g, 180 °C.

Liite B. VOC-adsorbenttinäytteiden kromatogrammit

AA0 R335 vol8L 4.6.2013

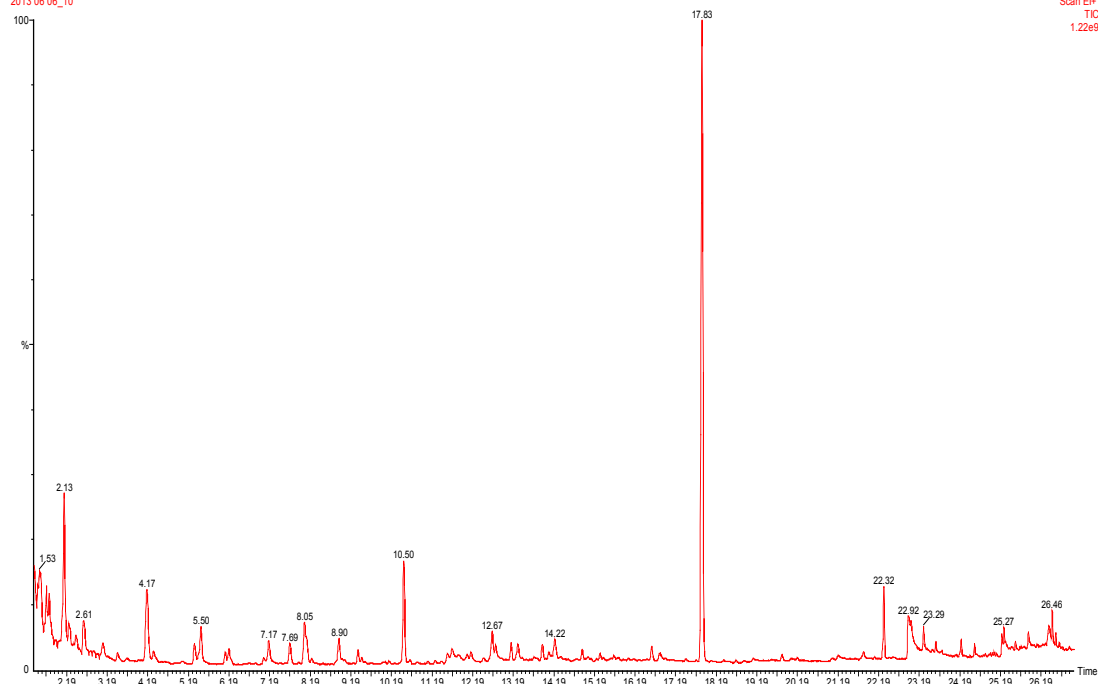
2013 06 06_10

, 06-Jun-2013 + 23:05:01

Scan EI+

TIC

1.22e9



AA0 R335 vol8L 4.6.2013

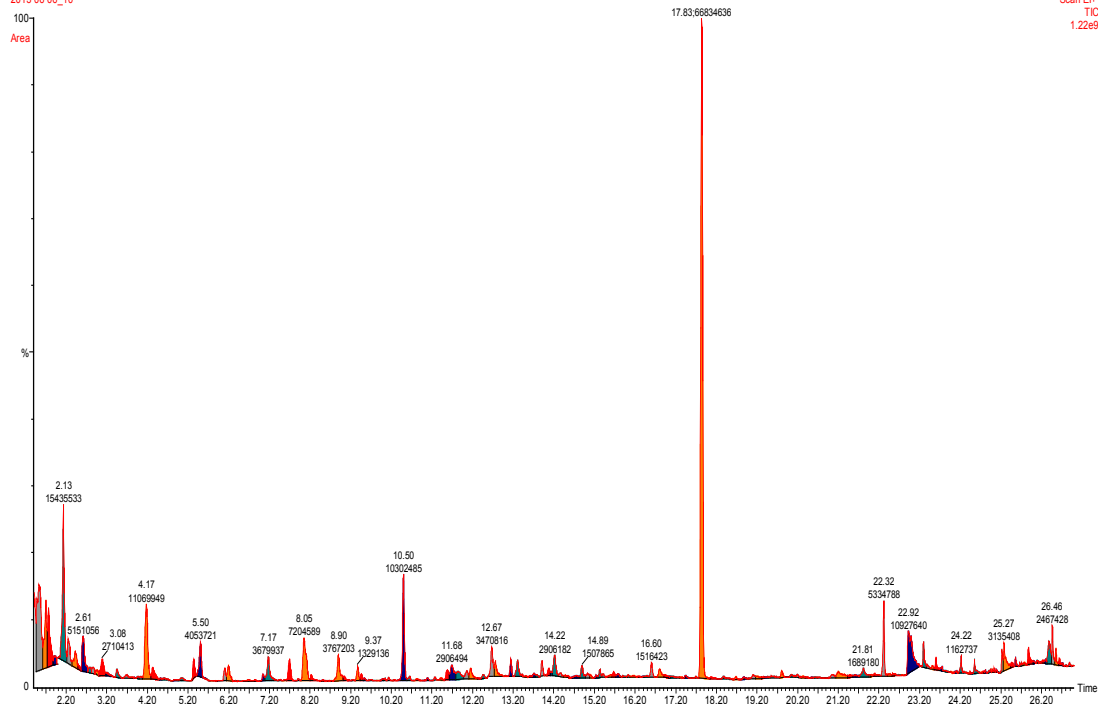
2013 06 06_10

, 06-Jun-2013 + 23:05:01

Scan EI+

TIC

1.22e9

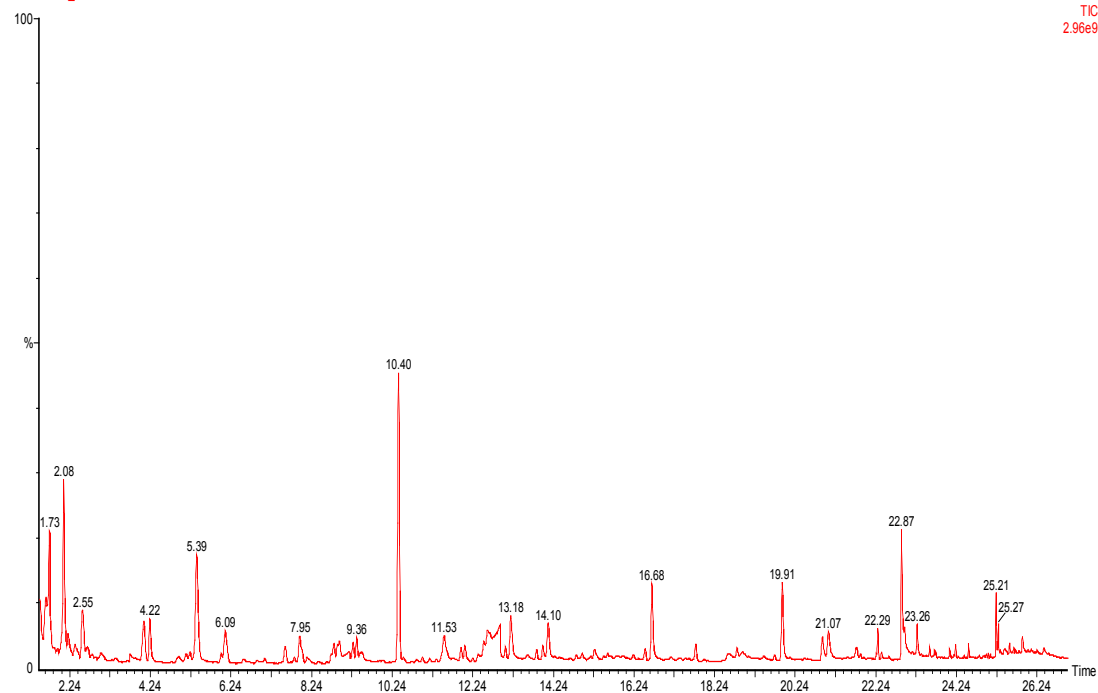


Kuva B1. VOC-adsorbenttinäytteen AA0 kromatogrammit.

BB3 R335 klo 20.00-20.45 verto 6 (8.6.2013)
2013 07 02_02

, 02-Jul-2013 + 17:33:52

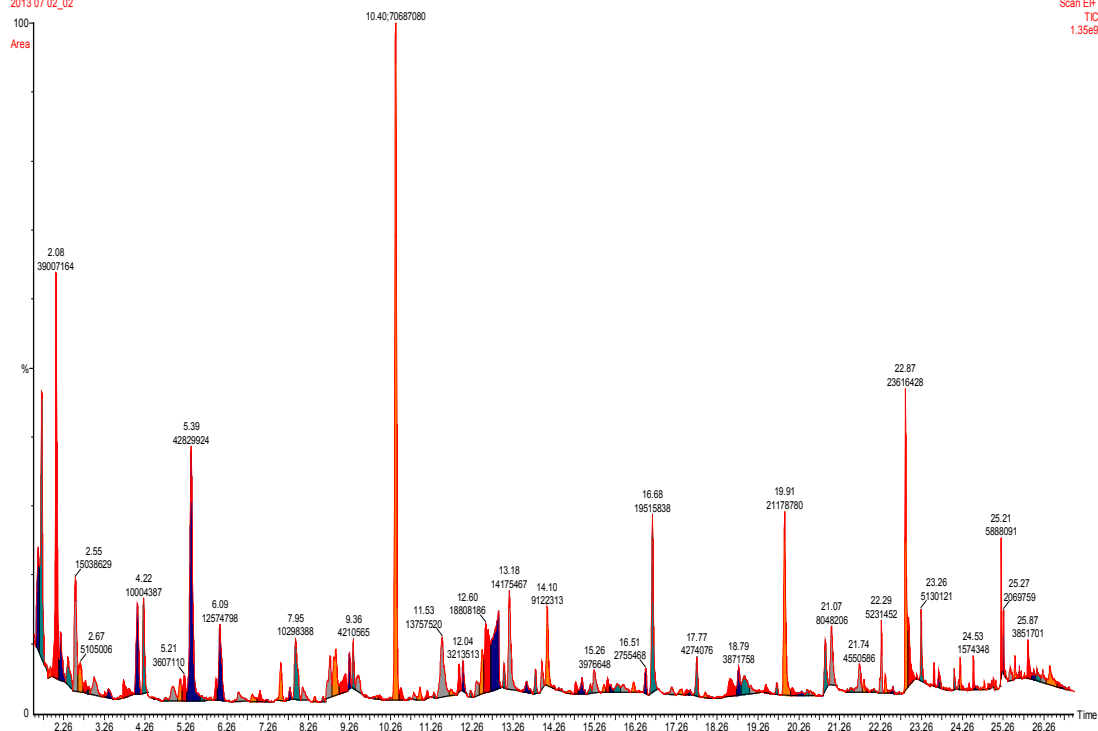
Scan EI+
TIC
2.96e9



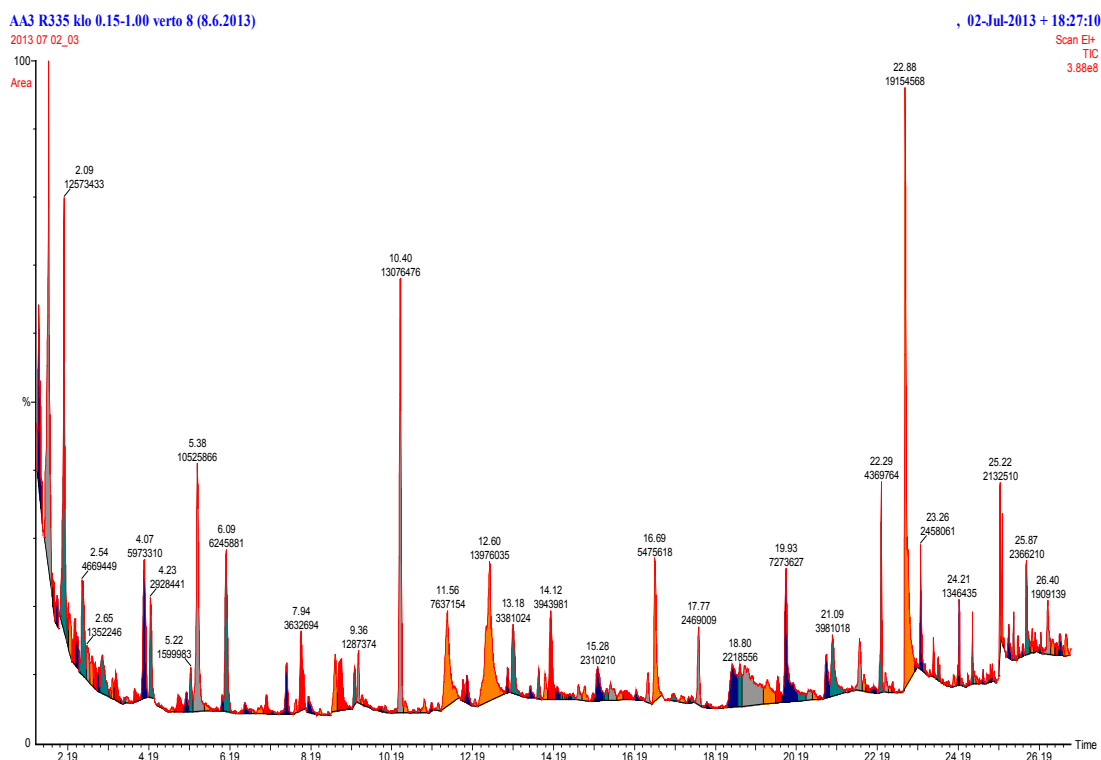
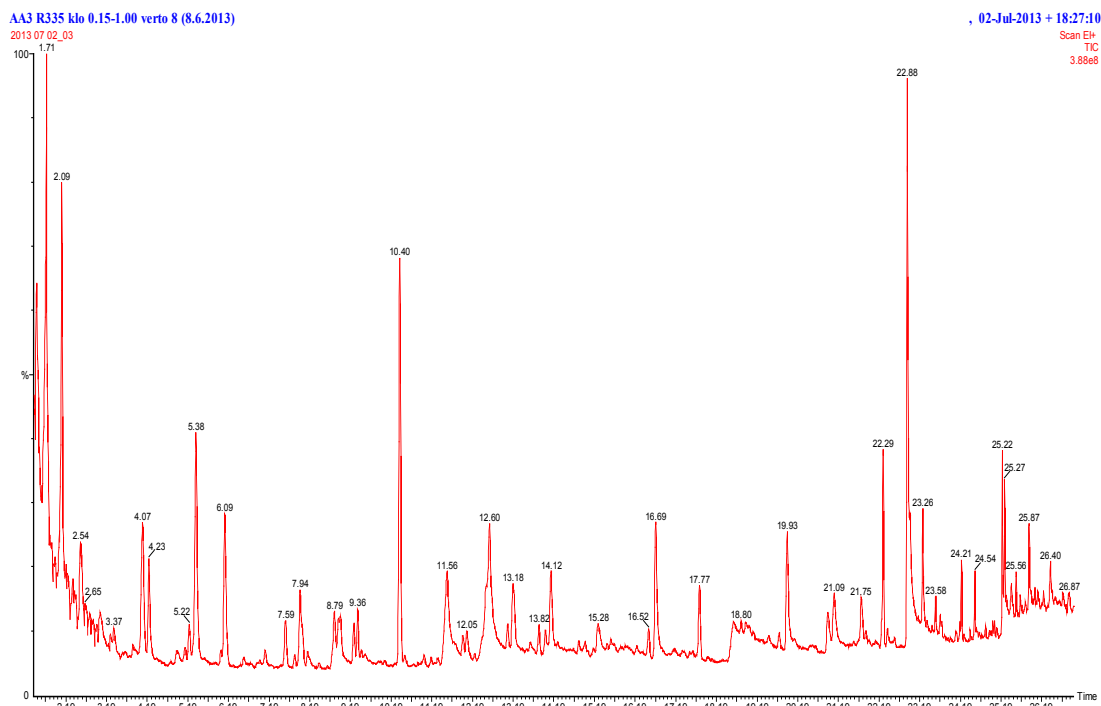
BB3 R335 klo 20.00-20.45 verto 6 (8.6.2013)
2013 07 02_02

, 02-Jul-2013 + 17:33:52

Scan EI+
TIC
1.35e9



Kuva B2. VOC-adsorbentinäytteen BB3 kromatogrammit.



Kuva B3. VOC-adsorbentinäytteen AA3 kromatogrammit.